



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

热力采油技术

■ 侯 健 孙建芳 主编

中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

热力采油技术

主 编 | 侯 健 孙建芳

编 者 | 杜殿发 李明川 蒋海岩



中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

热力采油技术 / 侯健, 孙建芳主编. — 东营: 中国石油大学出版社, 2012.6

ISBN 978-7-5636-3740-9

I. ①热… II. ①侯… ②孙… III. ①热力采油—高等学校—教材 IV. ①TE357.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 106698 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 热力采油技术

作 者: 侯 健 孙建芳

责任编辑: 穆丽娜(电话 0532—86981531)

封面设计: 九天设计

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 青岛锦华信包装有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 86983437)

开 本: 180 mm × 235 mm 印张: 19 字数: 373 千字

版 次: 2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

本书是按照石油院校石油工程专业的教学需要编写的。本书系统地介绍了以蒸汽吞吐、蒸汽驱、火烧油层为主的热力采油技术的基本原理和方法,主要包括:热力采油技术概况、油藏岩石/流体和水蒸汽的热物理性质、注汽管线的热损失、热力采油油藏工程方法、热力采油生产动态预测、热力采油的物理模拟和数值模拟、热力采油注采工艺及配套技术、典型热力采油油藏开发实例等八章内容。

本书既可作为石油院校有关专业的本科或研究生教材,也可供从事热力采油工作的科研人员和工程技术人员参考。

随着全球经济的发展,对石油能源的需求日益增长,在常规水驱油藏产量逐年递减的情况下,加大稠油等低品位油藏的动用和开发迫在眉睫。

世界上蕴藏着巨大的稠油资源且分布广泛,稠油资源丰富的国家有加拿大、委内瑞拉、美国、前苏联、中国等。世界上稠油的地质储量大约为 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,巨大的资源量决定了稠油将成为 21 世纪的主要能源。中国稠油陆上重油和沥青资源约占石油总资源量的 20% 以上,稠油年产量约占原油年总产量的 10%。随着稠油储量的不断发现和动用,稠油油藏的动用储量和产量在油田开发中所占有的地位越来越重要。

热力采油技术是稠油油藏开采的重要手段,主要包括蒸汽吞吐、蒸汽驱和火烧油层三种基本方法。与常规水驱开发相比,技术难度高、经济投入和风险高的特点为该项技术的推广应用带来挑战。但近年来稠油开采技术的巨大进步、油价的持续走高等有利因素推动了热力采油技术的大规模应用。以胜利油田为例,自 2001 年到 2010 年,稠油热采产量由 $143 \times 10^4 \text{ t}$ 大幅上升到 $421 \times 10^4 \text{ t}$,年增长率 21.6%,占胜利原油总产量的比例由 5.3% 上升到 15.3%,为胜利油田产量稳定做出了突出贡献。

本教材是根据石油院校石油工程专业的教学需要编写的,系统地介绍了以蒸汽吞吐、蒸汽驱、火烧油层为主的热力采油技术的基本原理和方法。全书分为八章:第一章介绍了稠油的定义及分类标准、热力采油技术采油机理和筛选标准、稠油开采技术的发展概况及研究新进展;第二章介绍了岩石、油藏流体和饱和水蒸汽的热物理性质;第三章介绍了注蒸汽过程中地面管线热损失和井筒热损失的计算方法;第四章介绍了热力采油油藏工程设计基础、不同热力采油方法的生产特征及影响因素、注蒸汽热力采油油藏采收率预测方法以及高温动态监测技术;第五章介绍了基于解析法和经验回归建立的蒸汽吞吐、蒸汽驱和火烧油层生产动态预测方法;第六章介绍了注蒸汽和火烧油层热力采油的物理模拟和数值模拟原理及方法;第七章介绍了注蒸汽和火烧油层热力采油的注采工艺及配套技术;第八章以单家寺、欢喜岭和金家油田为例,分别介绍了蒸汽吞吐、蒸汽驱和火烧油层热力采油先导试验。

本教材读者定位于石油工程专业高年级本科生或油气田开发专业硕士研究生,

编写中突出反映以下特点：

(1) 热力采油技术近期发展较快,在油田开发中的作用日益增强。本书的编写充分结合了国内外学者及编者科研过程中所取得的最新研究成果,力求体现时效性、先进性和理论性。

(2) 热力采油技术是一项复杂且技术密集的系统工程技术,涉及油田地质、油层物理、油藏工程、采油工程、传热学、地面工程、经济管理等多学科和专业。本书的编写注重与读者已学专业基础课或专业课的衔接,使读者能够建立起综合应用多专业知识解决矿场问题的能力。因此,本书编写力求突出综合性和系统性。

本教材由侯健教授、孙建芳高级工程师、杜殿发教授、李明川讲师和蒋海岩副教授共同编写。其中,第一章、第二章、第三章和第五章由侯健编写,第四章和第八章由孙建芳编写,第六章由杜殿发编写,第七章由李明川和蒋海岩编写,全书最后由侯健统稿完成。

在本教材编写过程中,参阅和引用了大量的文献资料,在此对所有文献作者表示感谢。陈月明教授、姚军教授对全书进行了审阅,并提出了许多宝贵意见,此外在本书编写过程中得到了官汝祥、高达、王传飞、罗福全、鹿腾、穆停华、吴金涛、陆雪皎、刘昊等研究生的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于笔者水平有限,书中难免存在不当之处,恳请读者批评指正。

侯 健

2013年5月于青岛

第一章 热力采油技术概况	1
第一节 稠油的定义及分类	1
第二节 热力采油基本方法	2
第三节 热力采油油藏的筛选标准	10
第四节 稠油开采技术新进展	13
习 题	21
参考文献	22
第二章 油藏岩石 / 流体和水蒸汽的热物理性质	23
第一节 油藏岩石的热物理性质	23
第二节 油藏流体的热物理性质	33
第三节 水蒸汽的热物理性质	38
第四节 温度对三相相对渗透率的影响	44
习 题	52
参考文献	54
第三章 注汽管线的热损失	56
第一节 热量传递的基本方式	56
第二节 地面管线的热损失	59
第三节 井筒的热损失	63
第四节 注汽参数分析及其变化规律	72
习 题	76
参考文献	77
第四章 热力采油油藏工程方法	79
第一节 热力采油油藏工程设计基础	79
第二节 热力采油油藏生产特征及影响因素	90
第三节 注蒸汽热力采油油藏采收率预测	114
第四节 高温动态监测技术	120

习 题	131
参考文献	131
第五章 热力采油生产动态预测	134
第一节 蒸汽吞吐生产动态预测	134
第二节 蒸汽驱生产动态预测	155
第三节 火烧油层生产动态预测	171
习 题	177
参考文献	177
第六章 热力采油物理模拟和数学模拟	181
第一节 热力采油的数学描述	181
第二节 热力采油物理模拟	195
第三节 热力采油数学模拟	206
习 题	220
参考文献	220
第七章 热力采油注采工艺及配套技术	223
第一节 热力采油注蒸汽系统	223
第二节 火烧油层工艺装备	229
第三节 注蒸汽采油工艺	232
第四节 注蒸汽采油配套工艺	245
习 题	254
参考文献	254
第八章 典型热力采油油藏开发实例	257
第一节 单家寺油田单 2 块蒸汽吞吐先导试验	257
第二节 欢喜岭油田齐 40 块蒸汽驱先导试验	267
第三节 金家油田火烧油层先导试验	274
习 题	283
参考文献	283
附录一 饱和水和干饱和蒸汽参数性质表	285
附录二 Marx-Langenheim 方程式中所用函数值	286
附录三 单位换算表	288
附录四 专业词汇对照	294



第一章

热力采油技术概况

热力采油(thermal recovery)技术主要用于稠油油藏的开发,同时该技术也是目前稠油油藏提高原油采收率最重要的手段。因此,本章首先对稠油的定义及分类标准进行介绍,并在此基础上介绍热力采油技术的基本方法及采油机理、筛选标准、稠油开采技术的发展概况及研究新进展。

第一节

稠油的定义及分类

稠油或重油(重质原油)(viscous crude, heavy oil)通常是指粘度高、密度大的原油。

联合国训练研究署(UNITAR)于1979年6月在加拿大召开了第一届国际重油及沥青砂(tar sand)学术会议,会议讨论了重油及沥青砂的资源评价、定义及分类标准、开采技术等。在1981年2月美国纽约联合国总部召开的专家讨论会议的基础上,于1982年2月在委内瑞拉召开的第二届国际重油及沥青砂学术会议上提出了关于重油和沥青砂的统一的定义和分类标准:

(1) 重油是指在原始油藏温度下,脱气油粘度为 $100 \sim 10\,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,或在 $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及大气压下密度为 $0.934 \sim 1.000 \text{ g/cm}^3$ 的原油。

(2) 沥青(bitumen)或沥青砂油(tar sand oil)是指在原始油藏温度下,脱气油粘度大于 $10\,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,或在 $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及大气压下密度大于 1.000 g/cm^3 的原油。

根据中国稠油的物理特点,可将其分为普通稠油(conventional heavy oil)、特稠油(extra heavy oil)和超稠油(super heavy oil)。表1-1是中国石油行业关于稠油的分类标准。

表 1-1 中国的稠油分类标准

稠油分类		主要指标		辅助指标
名 称	类 别	粘度/(mPa·s)		相对密度(20℃)
普通稠油	I	50*(或 100)~10 000		>0.920 0
	亚类	I-1	50*~150*	>0.920 0
		I-2	150*~10 000	>0.920 0
特稠油	II	10 000~50 000		>0.950 0
超稠油(天然沥青)	III	>50 000		>0.980 0

注:*指油藏条件下的原油粘度,其余指油藏温度下脱气油的粘度。

世界上蕴藏着巨大的稠油资源,且分布十分广泛,几乎所有产油国都有发现。世界上稠油资源丰富的国家有加拿大、委内瑞拉、美国、前苏联、中国等。世界上稠油的地质储量大约为 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,巨大的资源量决定了稠油将成为 21 世纪的主要能源。表 1-2 为世界主要稠油生产国的稠油资源量(不含中东地区)。

表 1-2 世界主要稠油生产国重油及沥青资源(张义堂, 2006)

国 家	探明地质储量/(10^8 m^3)		资源量/(10^8 m^3)	
	重 油	沥 青	重 油	沥 青
美 国	165. 4	35. 6	(165. 4)	92. 4
加拿大	5. 65	2 814	11. 25	4 001
委内瑞拉	432. 44	—	1 905	—
前苏联	4	1 211	135	2 146
中 国	13	3	180	

注:前苏联地区勘探程度低,统计不完全;美国稠油资源量统计数据欠缺,以探明地质储量代替。

中国蕴藏着丰富的稠油资源,陆上重油和沥青资源约占石油总资源量的 20% 以上,目前已在 15 个大中型含油气盆地和地区发现了数量众多的稠油油田(藏),稠油年产量约占原油总年产量的 10%。我国稠油油田分布比较集中,主要分布在辽河油区、新疆克拉玛依油区、胜利油区及河南南阳油区,其稠油储量约占全国稠油储量的 97% 左右。

第二节

热力采油基本方法

热力采油是指将地面和地下产生的热量引入油层,降低原油粘度,从而提高采收率

的方法。

热力采油主要包括 3 种基本方法: 蒸汽吞吐(cycle steam injection, steam soak, steam stimulation)、蒸汽驱(steam flooding)、火烧油层(in-situ combustion)。其中, 热水驱(hot water flooding)方法是蒸汽驱的一个特例, 即注入蒸汽的干度在地层中变为零的蒸汽驱。

一 注蒸汽热力采油

注蒸汽热力采油方法, 尤其蒸汽吞吐方法是开采重油和沥青重要的强化采油方法。目前我国仍有 80% 的稠油产量是靠蒸汽吞吐工艺获得的。

1. 注蒸汽热力采油方式

蒸汽吞吐和蒸汽驱可统称为注蒸汽热力采油方法。

1) 蒸汽吞吐

蒸汽吞吐是指周期性地向油井中注入一定量的蒸汽, 经过焖井后再开井产油的开采方法。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。

蒸汽吞吐采油过程可以分为 3 个阶段: 注汽(吞)阶段、焖井(焖)阶段和开井生产(吐)阶段, 如图 1-1 和图 1-2 所示。

(1) 注汽阶段。

此阶段将高温蒸汽注入油层中, 注入时间一般为几天到几周, 注入蒸汽的干度应尽可能地高。周期注入量取决于油层厚度, 一般每米油层注入蒸汽 70~120 t。

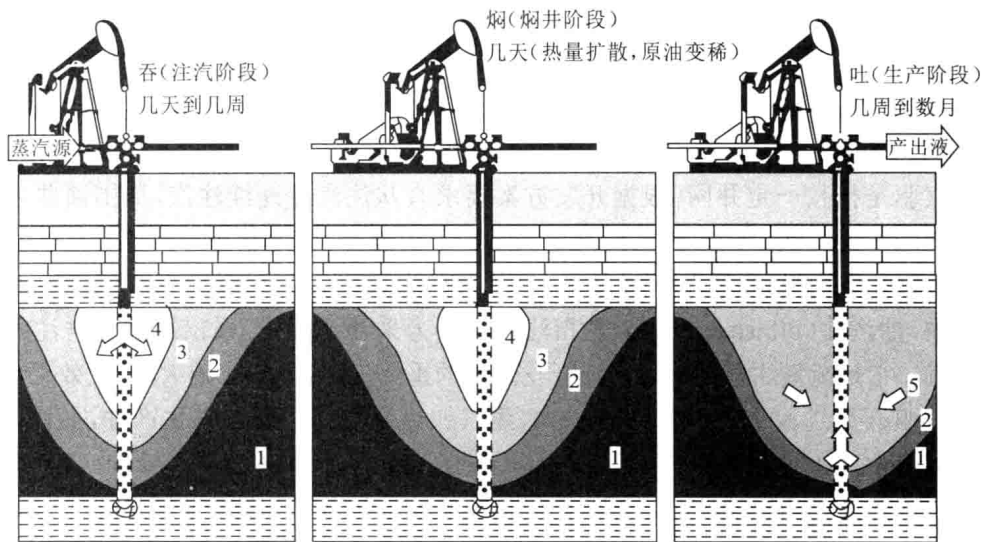


图 1-1 蒸汽吞吐过程示意图

1—冷原油; 2—加热带; 3—蒸汽凝结带; 4—蒸汽带; 5—流动原油与蒸汽凝结水

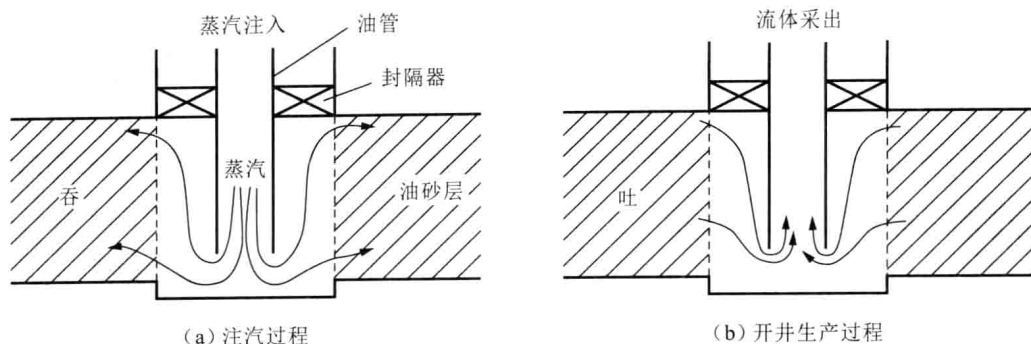


图 1-2 蒸汽吞吐工艺过程描述

(2) 焖井阶段。

注完蒸汽后立即关井(即焖井),使蒸汽携带的热量交换到油层中加热油层,减少回采液中携带的热量,提高热利用效率。焖井时间一般为 3~14 d。

(3) 开井生产阶段。

焖井结束后开始采油生产。当油层压力较高时,油井能够自喷生产,用较小的油嘴自喷以防止油层出砂。在开井生产的最初几天,采出液中含水率很高,但很快就会出现产油高峰,高峰期的产量一般很高,超过常规采油时的几十倍。高峰生产期产出的液体温度较高,通常超过注汽温度之半。当井底流压与地层压力小于自喷需要的流压时,即转入泵抽生产,该阶段持续时间为几个月到一年以上不等,这也是蒸汽吞吐原油生产的主要时期。随着采油时间的延长,由于油层中注入热量的损失及产出液带出热量的增加,被加热的油层逐渐降温,流向近井地带及井底的原油粘度逐渐增高,原油产量逐渐下降。当产量降到经济极限产量时,结束该周期的生产,重新进行下一周期的蒸汽吞吐作业。

2) 蒸汽驱

蒸汽驱是指按一定井网(根据开发方案要求),从注汽井连续注汽,周围油井以一定产量生产的开采方法。注入的蒸汽既是加热油层的能源,又是驱替原油的介质。当油气比达到一定经济极限时,蒸汽驱结束。

其中,油气比(oil-steam ratio)是指注蒸汽热力采油过程中,采出原油量与注入蒸汽量的比值。它是衡量注蒸汽热力采油开发效果的重要指标,油气比越大,开发效果越好。

蒸汽驱开采过程中,从注入井注入的蒸汽加热原油并把它驱向生产井,如图 1-3 所示。在蒸汽由注入井到生产井的过程中,形成了几个温度不同的带:蒸汽及部分冷凝水带、热水带、热油带和原始油带。蒸汽驱温度及饱和度的分布如图 1-4 所示。

(1) 蒸汽及部分冷凝水带。蒸汽注入油藏后在注入井周围形成一个饱和蒸汽带,其温度和蒸汽的温度相同,蒸汽带中的残余油饱和度降至最低。连续注入的蒸汽使蒸汽带

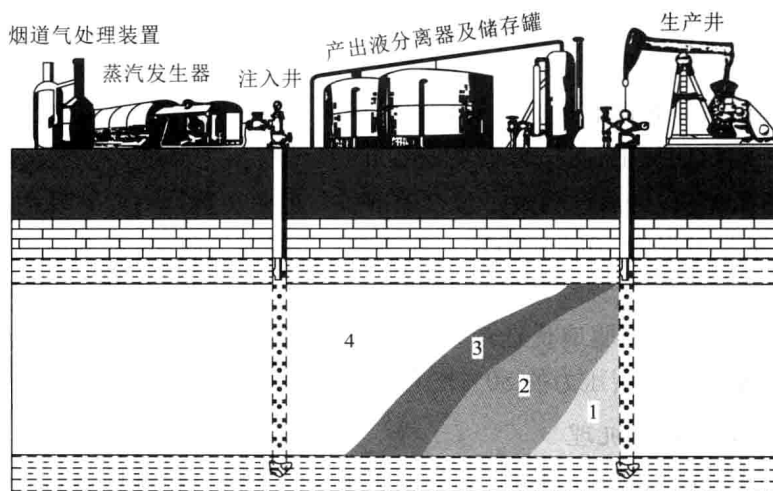
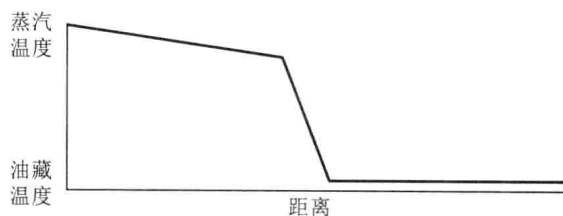
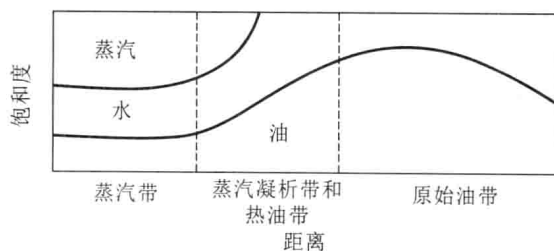


图 1-3 蒸汽驱过程示意图

1—原始油带；2—热油带；3—热水带；4—蒸汽及部分冷凝水带



(a) 温度分布



(b) 饱和度分布

图 1-4 蒸汽驱的温度及饱和度分布

向生产井推进，在蒸汽带前缘有部分冷凝水。

(2) 热水带。热水带是在蒸汽加热油层后，由释放热量、温度降低的蒸汽凝结而成的。在热水带推进过程中，其温度逐渐降低。在热水带中，由于蒸汽带前缘形成的溶剂油带具有抽提作用且蒸汽带的温度也较高，其残余油饱和度远远低于冷水驱。

(3) 热油带。热油带处于热水带之前，其温度在向前推进过程中进一步降低，最后和原始油层温度相同。热油带与原始油带相连。蒸汽带和热水带不断推进，并推动可动原

油前进,因而在它们的前方形成了原油饱和度高于原始值的油带。在油层原始区,温度和含油饱和度仍是最初状态。

蒸汽吞吐和蒸汽驱是既有区别又有联系的两个过程。蒸汽吞吐工艺简单,见效快,一方面可采出一定量的原油,另一方面蒸汽吞吐后,地层压力降低,地层温度上升,进一步发挥蒸汽的膨胀作用,为蒸汽驱做了必要的准备。但由于蒸汽吞吐波及面积小且属于衰竭式开采,其采收率仅为 10%~20%。为了进一步提高采收率,蒸汽驱是蒸汽吞吐发展的必然结果。

当然,蒸汽吞吐转蒸汽驱应优选最佳时机,一般主要应满足以下两个方面的条件:

① 地层压力降低到原始地层压力的 80% 左右;② 地层温度场形成一定的热连通。

2. 注蒸汽热力采油机理

蒸汽是一种携带较高热能的物质,热能注入地层后能较大幅度地提高油层温度。随着油层温度的升高,可以产生降粘(viscosity reduction)、热膨胀(thermal expansion)、蒸汽蒸馏(distillation)、改变相对渗透率等热效应。另外,蒸汽本身是一种物质,注入地层后能够提高地层压力,增加驱油能量。

注蒸汽热力采油机理主要体现在以下五个方面。

1) 降粘作用

随着高温蒸汽的注入,油层温度升高,使油、水粘度降低,但水粘度的降低程度比油小得多。原油粘度的大幅度下降,大大提高了原油的流动能力,改善了油水流动比,这也是稠油热采的主要机理。但原油粘度随温度的变化通常是可逆的。

2) 热膨胀作用

高温作用下导致油层岩石和流体体积膨胀,增加了弹性能量。热膨胀作用的大小取决于原油类型、初始含油饱和度和受热带的温度。轻质油的热膨胀系数大于重油,因此热膨胀作用在开采轻质油中所起的作用比开采重油更大。

3) 蒸汽蒸馏作用

在蒸汽驱过程中,产生蒸汽蒸馏和溶剂抽提作用,使原油中的轻质组分汽化成气相。当烃气与水蒸汽一起凝结时,凝析的轻质馏分与地层中的原始油混合并将其稀释,降低了原油的密度和粘度;同时在驱替过程中,蒸汽带前缘会出现轻质馏分的富集带,起到油相的混相驱替作用。

由于水蒸汽优先蒸馏油中的轻质馏分,因此蒸汽突破前产出的油比突破后产出的油要轻。蒸汽蒸馏作用在开采轻油中将起到更大的作用,因为轻油中含有更多的可蒸馏组分。

同时,蒸汽蒸馏作用还和系统的压力有关,系统的压力越低,蒸馏效果越明显。蒸汽蒸馏多发生在蒸汽驱过程中。蒸汽吞吐作为一种脉冲式开采方式,其注汽过程是非连续

的,加上注汽过程中压力较大,因此蒸馏作用相对较小。

4) 相对渗透率随温度的变化

由于地层温度的升高,吸附于岩石颗粒表面及油水界面上的沥青、胶质等极性物质解除吸附,使油层润湿性向亲水方向变化。油相相对渗透率增加,水相相对渗透率下降,同时残余油饱和度降低,有利于原油采收率的增加。

5) 解堵作用

高温蒸汽对岩石的冲刷可清除井壁污染,降低井底附近的渗流阻力。尤其是在蒸汽吞吐的第一个周期,解堵起到了很重要的作用。

可以看出,注蒸汽热采效果的好坏主要取决于蒸汽携带能量的大小以及蒸汽热量的利用程度,即应尽可能使蒸汽发生器产生蒸汽携带的热量用于加热油层,减少热损失(heat loss)。而在注蒸汽热力采油过程中,热损失主要来自于以下4个方面:①地面管线的热损失;②井筒的热损失;③顶底层的热损失;④产出液携带的热量。

3. 注蒸汽热力采油存在的问题

与火烧油层相比,注蒸汽热力采油工艺技术相对简单,易于控制。我国稠油开发应用比较成功的技术为蒸汽吞吐技术和中浅层蒸汽驱技术。但注蒸汽热力采油方法在矿场应用中仍存在以下突出的问题。

1) 蒸汽超覆(steam overlay)和提前突破

由于蒸汽和原油的密度差、渗透率的垂向非均质性以及平面非均质性,蒸汽沿油层上部窜进和沿高渗透带在生产井中提前突破,导致波及体积减小,蒸汽驱采收率下降。

蒸汽驱中的流度控制技术包括在注入井注入调剖化学剂(如高温聚合物、耐高温乳状液、高温泡沫剂、高温堵剂等)以及在生产井的产气层段进行封堵。矿场经验表明,在注入井用高温泡沫或蒸汽泡沫是一种较为有效的方法。同时,应大力发展有效的蒸汽驱动态监测方法。

2) 热效率问题

注蒸汽热采效果的好坏主要取决于蒸汽热量的利用程度。井底蒸汽干度的降低主要是由井筒热损失引起的,降低井筒热损失的措施包括:采用隔热性良好的隔热油管;采用液体 N_2 作环空的隔热介质;采用油水分离装置提高井口蒸汽干度等。

3) 地层伤害问题

大多数稠油油藏为胶结疏松或非固结的松散砂岩油层,通常敏感性粘土矿物的含量较高。因此在蒸汽注入地层后,极易发生粘土膨胀、微粒分散运移、岩石矿物溶解等地层伤害现象。另外,如果锅炉排出的蒸汽中带有固相颗粒,则会加剧对稠油油层的堵塞伤害。

4) 蒸汽发生器问题

蒸汽发生器存在环境污染、结垢以及热效率不高等问题。

二 火烧油层

火烧油层是通过注入空气(或氧气)与地层原油接触,以油层中部分重质原油作为燃料,采用人工井底点火或油层自发点火方式点火燃烧,产生的热量和燃烧产物用以降低原油粘度、膨胀原油体积、驱动地层原油,从而达到提高原油采收率的目的。

1. 火烧油层采油方式

火烧油层与蒸汽驱的最大区别在于在油层内产生热量,火烧油层技术进一步可分为干式正向燃烧、反向燃烧和湿式燃烧。

干式正向燃烧(dry forward combustion)也称为正燃法,注入的仅仅是空气或氧气而无水。由于点火是在注入井井底或井底附近,燃烧前缘从注入井向生产井方向推进,燃烧是正向向前的,前缘推进方向与注入空气的流动方向一致。图 1-5 为干式正向燃烧的温度分布及油层剖面图,燃烧前缘的温度最高,而在燃烧前缘后面的油层仍保持很高的温度,以加热注入的空气。

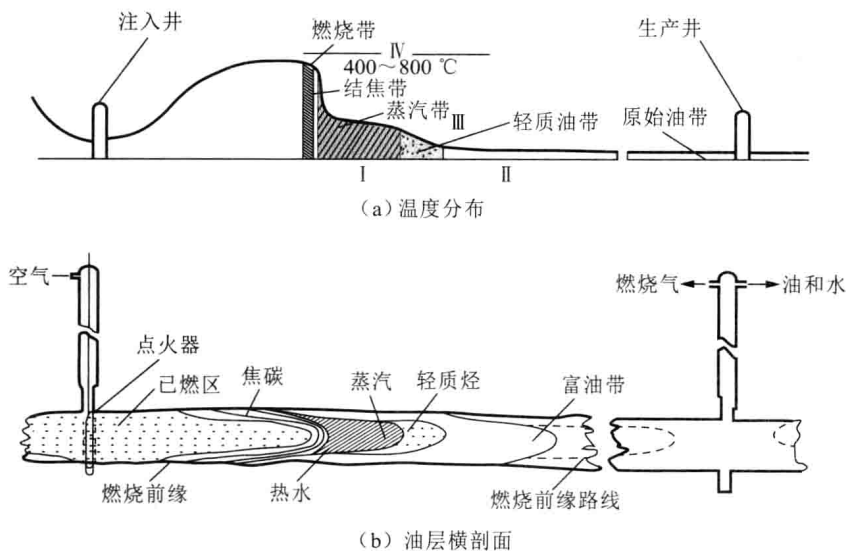


图 1-5 干式正向燃烧温度分布及油层剖面

该燃烧法是以原油中无价值的焦油(焦碳)作为燃料,具有以下缺点:① 采出原油必须经过低温地区,可能形成原油堵塞现象,高粘原油尤其明显;② 注入空气不能有效利用留在地层中的大量热能,热能利用率低。

反向燃烧(reverse combustion)也称逆燃法,是指在准备成为生产井的井中注入空气并点火燃烧,短距离燃烧后停止注气,然后转入邻井注空气,原始点火井变成生产井,前缘推进方向与注入空气的流动方向相反。正向和反向燃烧过程可用一个通俗的例子加以

说明,如点燃一支香烟,可用呼气和吸气两种方式使其燃烧:吸气时,燃烧带沿着吸气的方向向着嘴唇方向移动,这就是正向燃烧;而呼气时,燃烧带仍然向嘴唇方向移动,然而气体却朝着相反的方向流动,这就是反向燃烧。

反向燃烧可以弥补正向燃烧中靠近生产井的原油难以流动的缺陷,可以开采超稠油。但与正向燃烧相比,反向燃烧所需空气量为正向燃烧的2倍,它燃烧的是相对较轻的烃类。

湿式燃烧(wet combustion)也称联合热驱,是指在正向燃烧过程中,同时或交替注入空气和水,水在通过燃烧带时部分或全部汽化,并通过燃烧前缘,以扩大热影响范围,前缘推进方向与注入空气的流动方向一致。湿式燃烧是干式正向燃烧与水驱结合的一种热采方法,这种方法最大的优点在于可充分利用油层燃烧后残余的热量,使热能利用率达到最高限度,同时还可避免将高温带入生产井而损坏生产井管柱,缓解干式正向燃烧中的腐蚀问题。

2. 火烧油层采油机理

火烧油层是一种以热效应为主,蒸汽驱、混相驱和气驱等多种机理联合作用的驱油过程,其提高原油采收率的主要机理如下。

1) 原油的热裂解

在燃烧前缘,高温促使原油中的较轻质组分蒸发并向前推进,同时使留在砂粒上的重质组分产生裂解,形成气态烃和焦油,气态烃进入蒸发带,而焦油沉积在油砂上成为燃烧过程中的燃料。

2) 热驱作用

由于油层流体的对流以及地层岩石的传导作用,热能在油层中向前向下传递,使油层均匀加热,提高油层的扫油效率。

3) 冷凝蒸汽驱作用

燃烧产生的蒸汽与较冷的油层接触时,把热量迅速地传给地层,使原油粘度降低,从而提高原油的驱动能力。

4) 烃类混相驱作用

蒸馏作用和热裂解作用产生的气态烃混合进入凝析带中,由于温度较低而冷凝下来,冷凝的轻质油与地层原油混相,同时传递热量,改善原油的流动性能。

5) 气驱作用

注入的空气与焦油燃烧,形成的气体主要有 CO_2 和 N_2 ,与原油达到混相和非混相,降低原油粘度,改善原油特性,同时可以大大增加油层能量,提高原油的驱动力。

3. 火烧油层的技术优势及存在的问题

与注蒸汽热力采油相比,火烧油层具有以下技术优势: