



稠油油藏过热蒸汽吞吐 开发技术与实践

徐可强 ◎ 主编

石油工业出版社

稠油油藏过热蒸汽吞吐 开发技术与实践

徐可强 主编

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

稠油油藏过热蒸汽吞吐开发技术与实践/徐可强主编.
北京:石油工业出版社,2011.6
ISBN 978-7-5021-8482-7

- I. 稠…
- II. 徐…
- III. 稠油开采-研究
- IV. TE345

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 098939 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) 64523620

经 销:全国新华书店
印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2011年6月第1版 2011年6月第1次印刷
787×1092毫米 开本:1/16 印张:12.75
字数:326千字 印数:1—1000册

定价:110.00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

《稠油油藏过热蒸汽吞吐开发技术与实践》

编辑委员会

顾 问：吴耀文

主 任：王仲才

副主任：徐可强

编 委：徐安平 黄先雄 吴林钢 方甲中 赵晓明
范子菲 关维东 方宏长 邵建鸿

编 写 组

主 编：徐可强

副主编：黄先雄 关维东 程林松 朱新立 王金宝

主要编写人员：

张宝瑞	王洪星	赵 伦	关 胜	阿布都
高金强	王跃文	葛宝彦	李春涛	杨平平
周体尧	许安著	孙 涛	李春兰	田立志
王春喜	韩海水	曹天时	时正理	罗艳艳
蒋卫东	喻克全	吴淑红		

序

企业的发展离不开人才和技术，人才的培养离不开知识的积累。怎样把分散在企业内部的知识显形化，使它在企业内部传承发展，并转变成企业发展的强大动力。今天，中油阿克纠宾油气公司的专家们为我们做出了表率。

肯基亚克盐上油田是哈萨克斯坦阿克纠宾州南部的一个稠油油田，油藏埋深浅，原油黏度大，地层水敏严重。在苏联时期，采用注蒸汽热采开发技术，平均单井日产油只有 1.1t，截至 2005 年，地质储量采出程度仅为 13%。在常规冷采和热采效果不理想的情况下，如何有效开发盐上稠油一直是困扰油田开发专家们的突出问题。

为了早日实现盐上稠油油藏的高效开发，中油阿克纠宾公司的油田开发专家们就过热蒸汽开发机理、过热蒸汽装置设计和参数优化、沿程热力参数评价、产能预测方法等进行了多年研究，建立了一套稠油油藏注过热蒸汽开发技术理论体系，研制出了一种新型稠油油藏热采装备。在过热蒸汽开发机理方面，采用物理模拟方法，通过开展过热蒸汽改善储层渗流能力、原油水热裂解及过热蒸汽驱油机理实验，系统分析并揭示了稠油油藏过热蒸汽开采的机理；在过热蒸汽装置设计方面，设计了一种新型稠油热采装备，采用普通锅炉软化除氧水生产稠油热采工艺所需要的过热蒸汽的工艺技术，这是对国际动力工程领域公认技术难题的一次大胆突破；在沿程热力参数评价方面，提出并建立了过热蒸汽注入过程中沿井筒温度、压力参数计算新模型，以及到达井底蒸汽的实际状态计算评价新方法；在过热蒸汽吞吐产能预测方面，基于过热蒸汽采油机理及储层热利用效果评价，建立了稠油油藏过热蒸汽吞吐产能预测新模型。2005 年底，公司开始在盐上稠油油藏进行注过热蒸汽吞吐试验，效果非常明显，单井日产油达 10t 以上，试验区产量逐年攀升，实现了盐上稠油油藏的高效开发。

“十二五”期间，中国石油集团将进一步加快海外五个油气合作区的建设。

中亚地区要实现油气并举，率先建成海外油气合作示范区，就必须加快总结中亚地区十几年来积累起来的油气勘探开发的新理论和新方法，培养一批懂技术、有经验的油气勘探开发专家，增强公司技术持续的创新能力。《稠油油藏过热蒸汽吞吐开发技术与实践》一书的付梓，不仅丰富和发展了稠油油藏热采技术的理论和方法，而且也将为中亚地区实现油气并举，率先建成海外油气合作示范区提供强有力的技术保障。

祝贺之余，对海外工作者们默默奉献我国石油的敬佩之情油然而生。

A handwritten signature in black ink, reading '吴耀文' (Wu Yaowen). The signature is fluid and stylized, with the first character '吴' being particularly prominent.

2011 年 4 月 11 日

前 言

热力采油是开采稠油行之有效的方法，目前已形成热水驱、蒸汽吞吐、蒸汽驱、蒸汽辅助重力泄油（SAGD）、非凝析气辅助蒸汽驱（SAGP）和火烧油层等多项热力采油技术。由于稠油油藏一般具有油层胶结疏松的特点，注蒸汽过程中蒸汽的高速流动容易造成微粒运移使喉道发生堵塞，注入地层的蒸汽冷凝水与储层黏土矿物接触容易引发矿物膨胀，因此高温高压蒸汽的长期注入会对油层造成一系列的伤害。这一系列的伤害都会影响储层孔渗特性，使得热采开发效果不理想甚至变差。在常规蒸汽吞吐中，注入蒸汽干度达不到 100%，并且蒸汽由锅炉出口到达井底过程中热损失严重，导致部分蒸汽到达井底后冷凝为热水。因此，有必要研究一种低成本、高效率的热载体，以有效解决稠油油藏热采开发过程中日益突出的矛盾。与普通蒸汽相比，过热蒸汽具有更高的热焓和更大的比容，并且对已发生强水敏伤害的地层有明显的修复作用，可明显改善储层渗流环境。与传统热力采油技术相比，注过热蒸汽热采技术利用过热蒸汽携带热量高的优势，能够更好地加热地层。当注汽量相同时，过热蒸汽井具有更高的井底干度、更大的加热半径，其增产效果也更加明显。因此，注过热蒸汽技术可以更有效地提高稠油油藏的开发效果。

肯基亚克油田位于哈萨克斯坦共和国阿克纠宾州南部，该油田构造简单，为以盐丘为核心的近东西向短轴背斜。该油田于 1966 年陆续投入开发，动用的主要层系为中侏罗统，1972 年在局部区域进行注蒸汽试验，通过实施细分开发层系、减小井网密度、优化注蒸汽参数等一系列的注蒸汽开发技术，取得了一定的效果。但是受到当时工艺技术条件的限制，注入蒸汽质量较低（蒸汽温度 200℃，干度 0.3），而储层多孔介质又表现出较强的水敏特征，因此热采效果不理想。1983 年进行了大规模注热水和注蒸汽热采开发试验，但效果不佳。截至 2006 年底，地质储量采出程度仅为 13%。针对开发过程中存在的问题，中国石油阿克纠宾油气股份公司组织了多学科、多专业、多部门的教授、高级工程师等进行联合攻关，联合中国石油大学（北京）、中国石油工程设计公司等单位开展了《肯基亚克盐上油藏过热蒸汽吞吐增产机理及采油工艺技术研究》、《稠油热采蒸汽再加热装置技术研究》、《稠油注过热蒸汽吞吐技术提高稠油油藏开发效果现场试验》等课题，对稠油油藏过热蒸汽吞吐开发技术进行了开发机理、设备设计、产能预测及现场试验深入地探索研究。2005 年 10 月，第一口过热蒸汽吞吐试验井 61043 井投入试验。该井常规蒸汽吞吐产油量约 2t/d，而过热蒸汽吞吐后产油量达到 10t/d 以上，且稳产期较长。截至 2008 年 9 月，在该油藏北翼共进行了注过热蒸汽吞吐热采试验 30 井次，累计产油 6.55×10^4 t。与第一轮饱和蒸汽吞吐对比，平均单井增油量 1090t。过热蒸汽吞吐试验开始实施以来，试验区产量逐年攀升，截至 2010 年 12 月，过热蒸汽吞吐试验 I 区已累计产油 20.4×10^4 t。可见，注过热蒸汽技术实现了盐上稠油油藏的高效开发。

本书是多年来过热蒸汽科研成果和实践经验的总结与提炼。全书共分 8 章，从岩石及流体热物理性质、过热蒸汽热采机理、过热蒸汽装置设计、沿程参数评价、储层热利用效果评

价、产能预测方法、开发适应性条件及实际应用效果等方面，较为系统地总结了过热蒸汽吞吐开发机理和评价方法。其中，第1章对热力采油技术现状、过热蒸汽基本概念及工业应用情况进行了概述；第2章主要介绍了油藏岩石与流体的热物理性质方面的基本概念、计算方法等，是热采技术研究与应用的基础；第3章为稠油油藏过热蒸汽开采机理，在整理常规蒸汽热力采油机理基础上，以实验研究为主要手段，从黏土矿物成分、原油组分、驱油效率的变化入手，对过热蒸汽采油机理进行了全面的论述。第4章讲述了一种新型热采装备，从工艺原理出发，对过热蒸汽装置的组成、特点、参数优化、实际应用情况进行了全面介绍；第5章为沿程过热蒸汽参数评价方法，通过建立井筒沿程过热蒸汽温度、压力的计算模型，得到注入过程中过热蒸汽参数在井筒沿程的变化规律、到达井底蒸汽的实际状态的计算方法，结合过热蒸汽带地层参数表达式可进一步明确储层中的热利用效果；第6章为过热蒸汽吞吐产能预测方法，本章在传统蒸汽吞吐产能预测方法基础上，结合过热蒸汽采油机理及储层热利用效果评价，建立了稠油油藏过热蒸汽吞吐产能预测新模型，根据本章理论结合实际油藏参数可对过热蒸汽吞吐产能进行预测；第7章根据实际油藏开发资料，论述了稠油油藏过热蒸汽吞吐开发效果的主要影响因素，并结合油藏数值模拟方法提出了过热蒸汽吞吐的适应性条件；第8章对过热蒸汽吞吐开发技术在肯基亚克盐上油藏实践过程、效果及认识进行了全面的介绍。

出版本书的目的是对过热蒸汽吞吐技术的开发机理和评价方法进行系统地总结，力求将实验研究、理论分析与实际应用相结合，以满足油田开发工作者理论研究和现场应用的需求。目前，注普通蒸汽开发技术已广泛应用于稠油油藏，而过热蒸汽热采技术则刚刚起步。笔者希望，通过开展相关探索研究和总结，能够加快过热蒸汽采油技术在我国稠油油藏中的推广和应用，为合理、高效开发稠油油藏做出更大贡献。

本书是作者根据多年来肯基亚克盐上稠油油藏过热蒸汽开发技术研究成果和现场实践经验编写而成，书中许多观点是广大科研人员在肯基亚克盐上稠油油藏开发研究和实际工作中所形成的，是广大油田开发工作者共同的智慧结晶。

限于作者水平，书中的不足之处，恳请读者批评指正！

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 稠油的特征及分类	(1)
1.1.1 稠油的主要特征	(1)
1.1.2 稠油油藏一般地质特征	(2)
1.1.3 稠油分类	(2)
1.2 热力采油技术现状	(3)
1.2.1 我国稠油热采技术发展历程	(3)
1.2.2 目前主要热力采油技术	(5)
1.2.3 过热蒸汽开采稠油技术	(6)
1.2.4 热利用效果评价技术	(7)
1.3 过热蒸汽基本概念	(8)
1.3.1 过热蒸汽的产生过程	(9)
1.3.2 不同状态下水的热焓	(9)
1.3.3 过热蒸汽的工业应用	(11)
1.4 小结	(11)
参考文献	(11)
第2章 稠油油藏流体与岩石的热物理性质	(13)
2.1 水蒸气的热物理特性	(13)
2.1.1 蒸汽的饱和温度与压力的关系	(13)
2.1.2 蒸汽的热力学性质	(14)
2.1.3 蒸汽黏度	(16)
2.1.4 蒸汽的导热系数	(17)
2.1.5 不同状态蒸汽热物性参数对比	(17)
2.2 原油的热物理特性	(19)
2.2.1 原油的黏温关系	(19)
2.2.2 含气原油黏度的计算	(20)
2.2.3 含水原油黏度的计算	(21)
2.2.4 原油的比热及导热系数	(21)
2.3 油藏岩石的热物理特性	(22)
2.3.1 岩石的导热系数	(22)
2.3.2 岩石的热容与比热	(23)
2.3.3 油藏岩石的热扩散系数	(24)
2.4 小结	(25)

参考文献	(25)
第3章 稠油油藏过热蒸汽开采机理	(26)
3.1 常规蒸汽热力采油机理	(26)
3.1.1 高温降黏作用	(26)
3.1.2 热膨胀作用	(26)
3.1.3 蒸汽蒸馏作用	(27)
3.1.4 解堵作用	(27)
3.1.5 降低贾敏效应	(27)
3.1.6 提高蒸汽波及体积	(27)
3.1.7 混相驱作用	(28)
3.2 过热蒸汽改善稠油油藏储层渗流能力机理	(28)
3.2.1 储层中常见的黏土矿物	(28)
3.2.2 储层渗流能力改善实验	(30)
3.2.3 储层渗流能力改善机理	(33)
3.2.4 储层渗流能力改善效果评价模型	(36)
3.3 稠油油藏过热蒸汽水热裂解反应降黏机理	(38)
3.3.1 水热裂解反应机理	(39)
3.3.2 原油黏温特征模型	(41)
3.4 过热蒸汽的驱油机理	(44)
3.4.1 常规稠油的驱油效率	(44)
3.4.2 岩石表面润湿性的影响	(51)
3.4.3 过热蒸汽提高驱油效率的机理	(51)
3.5 小结	(53)
参考文献	(53)
第4章 产生过热蒸汽的装置及工艺参数优化	(56)
4.1 过热蒸汽产生装置概述	(56)
4.2 蒸汽发生器的结构	(58)
4.2.1 辐射段	(58)
4.2.2 对流段	(58)
4.2.3 余热回收系统	(58)
4.2.4 燃烧器	(58)
4.2.5 通风系统	(58)
4.3 蒸汽发生器的主要技术指标	(59)
4.3.1 热负荷(额定热功率)	(59)
4.3.2 炉膛容积热负荷	(59)
4.3.3 辐射表面热负荷	(59)
4.3.4 对流表面热负荷	(60)
4.3.5 热效率	(60)
4.3.6 炉膛出口烟气温度	(60)

4.3.7 管内工质质量流速	(61)
4.4 设计计算的基本传热方程	(61)
4.4.1 热辐射的基本定律	(61)
4.4.2 热辐射换热计算的基本概念及方程	(63)
4.4.3 管式加热炉的对流传热计算方程	(68)
4.5 工质压力损失及烟风阻力计算	(70)
4.5.1 管内工质压力损失计算	(70)
4.5.2 烟风阻力计算	(73)
4.6 燃料燃烧计算	(80)
4.6.1 燃料油的燃烧计算	(80)
4.6.2 燃料气的燃烧计算	(86)
4.7 过热蒸汽装置	(88)
4.7.1 工艺原理	(88)
4.7.2 过热蒸汽装置组成	(88)
4.7.3 过热蒸汽装置自动化配置	(89)
4.7.4 过热蒸汽装置主要特点	(89)
4.7.5 与常规热采锅炉比较	(90)
4.7.6 下一步需要着重研究解决的问题	(90)
4.8 过热蒸汽装置工艺参数优化	(91)
4.8.1 装置热负荷的优化	(91)
4.8.2 装置设计压力优化	(92)
4.8.3 装置入口蒸汽干度的优化	(92)
4.8.4 装置工艺流程的优化	(93)
4.8.5 过热蒸汽装置自动控制优化	(93)
4.8.6 过热蒸汽装置隔热保温材料的优化	(94)
4.8.7 过热蒸汽装置炉管材料的优化	(96)
4.9 应用案例	(97)
4.10 小结	(98)
参考文献	(99)
第5章 过热蒸汽沿程参数评价方法	(100)
5.1 注过热蒸汽沿程热损失计算方法	(100)
5.1.1 注过热蒸汽井筒中蒸汽参数计算模型	(100)
5.1.2 计算参数处理方法	(104)
5.1.3 模型计算步骤	(110)
5.1.4 实例分析	(111)
5.1.5 井筒沿程蒸汽参数评价	(112)
5.2 过热蒸汽吞吐储层热利用效果评价方法	(116)
5.2.1 过热蒸汽吞吐地层加热带模型	(116)
5.2.2 不同注入流体产能计算	(118)

5.2.3 应用实例	(120)
5.3 小结	(122)
参考文献	(122)
第6章 过热蒸汽吞吐产能预测方法	(124)
6.1 常规蒸汽吞吐产能预测方法	(124)
6.1.1 Boberg – Lantz 产能预测方法	(124)
6.1.2 考虑蒸汽超覆的计算方法	(126)
6.2 过热蒸汽产能动态预测方法	(129)
6.2.1 过热蒸汽吞吐产能的动态预测方法	(129)
6.2.2 模型参数的计算方法	(131)
6.2.3 实例计算分析	(135)
6.3 小结	(137)
参考文献	(137)
第7章 稠油油藏过热蒸汽吞吐效果影响因素及适应性条件	(138)
7.1 稠油油藏过热蒸汽吞吐开发效果影响因素	(138)
7.1.1 试验区生产井的分类	(138)
7.1.2 过热蒸汽吞吐井的生产特征	(140)
7.1.3 过热蒸汽吞吐生产特征影响因素分析	(142)
7.2 过热蒸汽吞吐开发的适应性条件	(149)
7.2.1 地质模型的建立	(149)
7.2.2 过热蒸汽吞吐开发效果影响因素分析	(150)
7.2.3 过热蒸汽吞吐可行性标准的确定	(154)
7.3 小结	(156)
第8章 过热蒸汽吞吐开发技术在肯基亚克盐上油藏的实践	(157)
8.1 肯基亚克盐上油藏的基本情况	(157)
8.1.1 区域地质概况	(157)
8.1.2 油田地质特征	(157)
8.1.3 勘探开发历程	(167)
8.2 不同开发方式下开发效果评价	(170)
8.2.1 冷采开发生产效果评价	(170)
8.2.2 饱和蒸汽吞吐开发生产效果评价	(172)
8.2.3 蒸汽驱开发生产效果评价	(172)
8.2.4 热水驱开发生产效果评价	(173)
8.2.5 聚合物驱开发生产效果评价	(174)
8.3 肯基亚克盐上油藏过热蒸汽吞吐开发参数优化	(175)
8.3.1 注汽速度优化	(175)
8.3.2 注汽强度优化	(176)
8.3.3 合理焖井时间优化	(177)
8.3.4 排液速度优化	(179)

8.3.5	吞吐周期注汽量优化	(180)
8.4	肯基亚克盐上油藏过热蒸汽吞吐实施方案	(181)
8.4.1	2005 年首批试验井实施方案	(181)
8.4.2	2007 年扩大试验实施方案	(183)
8.4.3	油气开采技术与工艺	(185)
8.5	肯基亚克盐上油藏过热蒸汽吞吐实施效果	(185)
8.5.1	61043 井生产效果	(185)
8.5.2	肯基亚克盐上油藏过热蒸汽吞吐实施效果	(186)
8.6	小结	(190)

第1章 绪 论

在世界石油资源中，稠油油藏占有相当的比重，稠油油藏的高效开发对于整个石油工业意义重大。在已形成的稠油油藏开采技术中，注热水、注普通蒸汽开采稠油技术已得到广泛的推广和应用，而过热蒸汽采油技术及其理论还处于研究阶段。本章详细介绍了稠油的特征及分类、热力开采稠油技术现状以及过热蒸汽的基本概念等内容，为后续章节全面、系统地阐述过热蒸汽开发稠油油藏技术奠定了基础。

1.1 稠油的特征及分类

1.1.1 稠油的主要特征

对于黏度高、密度大的原油，国内叫“稠油”，国外一般称之为“重油”（Heavy Oil, Heavy Crude Oil），对黏度超过 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的重质原油也叫做天然沥青或沥青砂油（Bitumen 或 Tar Sands）。相对于一般原油而言，稠油具有以下几个特点：

（1）稠油与轻质油在组分上的差别在于稠油中胶质、沥青质含量高，低碳链的饱和烃含量偏低。稠油中胶质、沥青质含量一般为 30% ~ 50%，饱和烃、芳香烃含量为 50% ~ 60%。

（2）稠油中含蜡量少、凝固点低。原油凝固点的大小主要取决于含蜡量的多少，也与原油中重质组分含量有关。含蜡量高，则凝固点也高。稠油含蜡量一般小于 10%，其凝固点一般低于 20°C 。我国部分稠油油田含蜡量小于 5.0%，凝固点大多在 0°C 以下。如克拉玛依油田稠油含蜡量为 1.4% ~ 4.8%，原油凝固点为 $-16 \sim -23^{\circ}\text{C}$ 。孤岛油田稠油含蜡量为 5% ~ 7%，凝固点为 $-10 \sim -26^{\circ}\text{C}$ 。

（3）稠油含气量少，饱和压力低。稠油油藏在其形成过程中，由于生物降解及其破坏作用，天然气及轻质成分的散失，使原油中轻质馏分含量低，含气量低。200℃ 馏分一般小于 10%，原始气油比一般小于 $10\text{m}^3/\text{t}$ ，有的则小于 $5\text{m}^3/\text{t}$ ，油藏饱和压力低，天然能量小。

（4）稠油的黏度对温度极为敏感。一般情况下，随温度的升高，稠油的黏度呈指数式下降。在油层中很难流动，甚至是塑性体状态的原油，当注蒸汽加热到 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 时，黏度急剧降到 $10\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以下，变得很容易流动。这也就是用常规方法难以开采稠油，但采用热采方法就可顺利开采的依据。

另外，在常温或温度较低时，稠油通常表现出非牛顿流体特征，而随着温度升高，不仅稠油的流动性增加，其流变特征也逐渐向牛顿流体转变。

1.1.2 稠油油藏一般地质特征

稠油油藏相对于稀油油藏而言，具有以下两个特点：

(1) 油藏大多埋藏较浅。我国稠油油藏一般集中分布于各含油气盆地的边缘斜坡地带以及边缘潜伏隆起倾没带，也分布于盆地内部长期发育断裂带隆起上部的地堑。油藏埋藏深度一般小于1800m，埋藏浅的有的可出露地表，有的则离地表几十米至近百米。但井深3000~4500m也有稠油油藏，为数较少。

(2) 储层胶结疏松、物性较好。稠油油藏储层多为粗碎屑岩，我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，储层胶结疏松，成岩作用低，固结性能差，因而，生产时油井易出砂。稠油油藏储层物性较好，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0.5~2.0D。

1.1.3 稠油分类

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。为此，许多专家对稠油分类标准进行了研究并多次举行国际学术会议进行讨论。

1.1.3.1 国外重油分类标准

联合国培训研究署（UNITAR）推荐的重油分类标准如表1-1所示，委内瑞拉的重油分类标准见表1-2。

表1-1 UNITAR 推荐的分类标准

分类	第一指标	第二指标	
	黏度 ^① (mPa·s)	密度 (60 °F) (kg/m ³)	密度 (60 °F) (°API)
重质原油	100 ~ 10000	934 ~ 1000	20 ~ 10
沥青	> 10000	> 1000	> 10

①指油藏温度下的脱气原油黏度，用油样测定或计算出。

表1-2 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 (0 ~ 20° API) (2) 黏度 < 10000mPa·s
特重原油	(1) 相对密度 > 1.000 (< 10° API) (2) 黏度 ≤ 10000mPa·s
沥 青	(1) 相对密度 > 1.000 (< 10° API) (2) 黏度 > 10000mPa·s

1.1.3.2 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。根据我国稠油的特点分类标准如表1-3所示。在分类标准中，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。

表 1-3 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 (mPa·s)	密度 (20℃) (g/cm ³)	
普通稠油	I	50 ^① (或 100) ~ 10000	>0.9200	
	亚类	I-1	>0.9200	可以先注水
		I-2	>0.9200	热采
特稠油	II	10000 ~ 50000	>0.9500	热采
超稠油 (沥青)	III	>50000	>0.9800	热采

①指油层条件下黏度，其他指油层温度下脱气油黏度。

1.2 热力采油技术现状

1.2.1 我国稠油热采技术发展历程

1958年，在我国新疆准噶尔盆地西北缘断阶带发现了马尔禾—夏子街浅层稠油带，打井48口，发现两个浅层稠油层，分布面积几十平方千米。在克拉玛依黑油山可以看到浅层稠油露头油砂。这种稠油黏度高，流动困难，难以开采。1965年开始，在黑油山浅油层进行了几口油井的蒸汽吞吐开采试验。1967—1971年，在黑油山8024井组进行了蒸汽驱试验。该井组为一个七点法井组，由3口角井注汽，3口角井及中心井采油，井距40m，并有2口观察井。油层深度99~103m，原油黏度10000mPa·s。汽驱1年零5个月，原油采收率高达68%，累计油气比0.115t/t；如按高峰末期，采收率约60%，油气比为0.148t/t。以后又在其他浅层油井进行蒸汽吞吐开采。截至1980年底，共进行了47井次吞吐作业^①，拉开了我国稠油热采的序幕。

1966—1967年，在石油工业部领导的直接指导下，在克拉玛依油田、胜利胜坨油田及吉林扶余油田又开展了三个火烧油层先导试验。由于“文化大革命”大动乱而中途停止试验。

1978年，我国东部辽河油区发现了高升稠油油田，相继在胜利油区发现了深层稠油油田，到1982年，已陆续发现20多个稠油油藏。尽管东部地区的稠油油藏多数埋藏深度超过800m，甚至达到1700m，原油黏度高达数千至数万毫帕秒，但油层较厚，油层物性较好，储量丰度高，储量大。国民经济建设对原油增长的需求，要求尽快开发，因而在石油工业部领导的重视及具体组织下，以东部为主攻地区，即以深层稠油为主要对象，在国家改革开放政策指引下，依靠科学技术进步，通过引进了美国、加拿大等国先进的技术设备，主要依靠我国自己的技术，开始了我国稠油开发技术崭新的开发时期。

从1980年到1995年，我国稠油开发技术的发展大致经历了三个阶段，1980—1985年，以稠油蒸汽吞吐开采技术为目标；1986—1990年，以稠油蒸汽吞吐技术推广应用与稠油蒸

① 据杨良贤、张连秋，克拉玛依油田稠油区注蒸汽采油矿场试验总结报告，1981年5月。

汽驱先导试验为目标；1991—1995年，以改善蒸汽吞吐及蒸汽驱开采效果为目标，连续进行技术攻关。前两个阶段，稠油蒸汽吞吐开采技术及稠油蒸汽驱先导试验都分别作为“六五”及“七五”国家技术攻关项目，由中国石油天然气总公司统一组织协调，辽河油田、新疆油田、胜利油田、河南油田及中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院等单位，进行了卓有成效的开创性科学研究及现场热采工艺技术的配套完善，并获得了重大科技成果奖。

值得指出的是，辽河油田与中国石油天然气总公司勘探开发科学研究院密切合作，在深井注蒸汽关键技术研究的基础上，采用国产隔热油管，于1982年首次在高升油田深度1600m的7口油井蒸汽吞吐试验成功，当年热采产量 1.2×10^4 t，成为我国稠油热采技术发展的新起点。中国石油天然气总公司勘探开发科学研究院创建了热采实验室，后来成为稠油热采研究中心（研究所），以“双模”技术为主，发挥了推动热采技术的先驱作用。辽河油田在深井注蒸汽开采配套技术上发挥了“火车头”的作用。两单位合作，于1984年共同完成了我国第一个整装深层油田——高升油田的注蒸汽开发设计方案并投入实施取得了成功，年产量达到 1×10^6 t。

由于深井蒸汽吞吐开采技术的重大突破，蒸汽吞吐开采增产幅度大，第一周期单井产量由几吨或不出油，激增到50t/d以上，少数油井甚至达到80t/d以上，因而很快推广应用到许多新油田。

1985年，全国（辽河油田、新疆克拉玛依油田、胜利油田）共进行了蒸汽吞吐作业229井次，热采产量 75×10^4 t，年油气比3.36t/t。1986年，蒸汽吞吐作业425井次，热采产量 150×10^4 t，油气比1.67t/t。到1990年，全国（辽河油田、新疆克拉玛依油田、胜利油田、河南油田）蒸汽吞吐4358井次，热采产量 733.4×10^4 t。到1993年，全国蒸汽吞吐9229井次，热采产量 1066×10^4 t（其中，蒸汽吞吐产量 1017×10^4 t，蒸汽驱产量 49.2×10^4 t），全国稠油产量 1189×10^4 t，约占当年全国原油产量的8.5%。

我国稠油开发，从1982年油层最深的高升油田（1600~1700m）蒸汽吞吐技术试验成功，成为新起点，十几年来，热采技术不断完善，开发水平不断提高，开发规模不断扩大，稠油产量持续大幅度增长。到1993年止，10年累计产量达 6000×10^4 t，其中热采产量 5200×10^4 t。从1985年起，平均每年增长 136×10^4 t。同时经济效益十分显著，先后建成了辽河油田、新疆油田、胜利油田、河南油田等4个稠油生产基地及北京石油勘探开发研究院稠油热采研究中心，为我国稠油开发作出了贡献。

1985—1995年，稠油开发以蒸汽吞吐开采技术为主要方法。常规冷采产量仅为 100×10^4 t/a左右。蒸汽吞吐开采技术已完善配套，开发效果较好，但仍需改善油层纵向动用程度，而且许多区块或油藏已处在蒸汽吞吐开采中后期。1988年，全国第一个应用丛式井技术进行稠油开发的杜48块杜家台油层投入生产。欢喜岭油田锦7块兴隆台油层投入蒸汽吞吐开发^[1]。

1991年，辽河油田高升油田高3-4-76井组开始进行蒸汽驱试验。蒸汽驱开采仍在进行工业性试验及技术发展、完善阶段。1998年10月，辽河油区欢喜岭油田齐40块转入蒸汽驱试验以来，平均单井日产由原来的2.6t提高到现在的4.8t，采收率达到25.28%，加上转蒸汽驱前蒸汽吞吐阶段24%的采收率，累计采收率达到49.28%。2003年，辽河油田齐40块进行7个井组的蒸汽驱扩大试验。截至2004年底，齐40块在蒸汽驱阶段累计生产