稠 油 注 蒸 汽 热 采 工 程

刘文章　编著

石　油　工　业　出　版　社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 提 要

本书是国内第一本稠油热采工程技术方面的专著。较全面、系统地概述了稠油油藏注蒸汽热采工程的基本理论、方法及实践经验。全书共十四章，包括注蒸汽热采的基本理论及基础研究，稠油油藏评价、油藏工程研究与设计方法，蒸汽吞吐开采方法及经验，蒸汽驱开采方法及经验，井筒隔热技术、热采井完井技术及热采经济分析方法等几个专题。本书按系统工程、理论与实践相结合的原则，既有较高的理论，又结合国内油田特点，反映出我国的技术特色，同时也具有实用性、资料性及应用技术的可操作性。

可供石油开发、采油工程及科技人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

稠油注蒸汽热采工程/ 刘文章编著.
北京：石油工业出版社，1997. 7
ISBN 7 - 5021 - 1982 - 5

Ⅰ. 稠…
Ⅱ. 刘…
Ⅲ. 粘性原油 - 注蒸汽 - 热效驱油
Ⅳ. TE345

中国版本图书馆 CIP 数据核字（97）第 06454 号

石油工业出版社出版
（100011　北京安定门外安华里二区一号楼）
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行
*
787×1092 毫米 16 开本 35 印张 877 千字 印 1—2000
1997 年 7 月北京第 1 版　1997 年 7 月北京第 1 次印刷
ISBN 7 - 5021 - 1982 - 5/ TE·1668
定价：45. 00 元

序

稠油资源在我国分布广泛，以前由于这类原油的粘度很高，在油层及井筒中的流动阻力极大，难以有效开发。经过最近十几年的科学研究及现场技术攻关，采用注蒸汽热采新技术，陆续开发了一批稠油油田，打开了新局面。以 1982 年为起点，全国陆上稠油产量逐年上升，1985 年突破 100×10^4t；1992 年达到 1000×10^4t 以上；1994—1996 年保持 1200×10^4t 水平，为全国陆上原油产量稳定增长做出了重要贡献。

《稠油注蒸汽热采工程》的作者刘文章同志是我国从事石油开采工程的知名专家，也是我国稠油热采工程技术开拓者之一，曾荣获数项国家级技术进步奖，具有非常丰富的实践经验和较高的理论水平。本书总结了他和他的同行们十多年来科研和现场的实践经验，也是国内第一本稠油热采技术专著。

稠油热采技术是涉及多学科、多专业的系统工程。作者从基本理论概念和多种分析方法入手，对有关稠油热力开采的技术专题进行了系统阐述。尤其是针对我国稠油油藏的特点和各种技术难点提出了许多新观念和新方法，并组织完善了热采工程配套技术系列。如我国稠油油藏分类标准和稠油油藏热采评价筛选标准的拟订、深井注蒸汽井筒隔热技术、蒸汽吞吐技术的研究与应用、蒸汽驱技术的应用条件及潜力的分析研究等。

本书内容丰富，层次清晰，系统完整，具有较高的理论水平，同时注意了应用技术的可操作性。

展望今后，我国稠油油田的勘探开发将继续发展，稠油热采技术还将进一步提高，尤其是已开发稠油油田围绕提高采收率，改善开发效果的任务还很重，相信这本书的出版将会起到积极的促进作用。

1996 年 8 月 30 日

前　言

1978 年以来，在我国东部地区相继发现了一批稠油油藏。这种特殊类型的原油，由于胶质沥青含量高，在油层条件下的粘度高达几百、几千、甚至几十万毫帕秒，采用常规冷采或普通水驱方法很难有效开发，这对采油工作者是一个严峻的挑战。

从 1978 年开始，在原石油工业部康世恩老部长的具体指导下，开展了稠油油藏注蒸汽热力开采的技术攻关。作者受命组织创建了石油勘探开发科学研究院的稠油热采实验研究室，并与辽河石油勘探局等密切合作，经过“六五”、“七五”两个五年国家技术攻关项目“稠油蒸汽吞吐开采”和“稠油蒸汽驱先导试验”，基本上形成了注蒸汽开采的配套工艺技术，开拓性地打开了我国稠油开发的新局面。经过三年的室内研究及现场准备，1982 年在辽河高升油田深度 1600 m 的第一批油井蒸汽吞吐试验成功，1985 年热采产量达到 75×10^4 t，1990 年达到 800×10^4 t 以上，1992 年上升到 1000×10^4 t 以上。1995 年稳定在 1200×10^4 t 水平，为陆上原油产量的稳定增长作出了贡献。

我国稠油油藏类型很多，地质条件较复杂，尤其是东部主要稠油产区的油藏深度绝大部分在 800～1700 m，注蒸汽热力开采技术的难度极大，面临许多复杂的技术难题，因而已取得的技术成就及经验也具有自己的特色。作者直接参与并组织研究了这项重大工程技术项目及多种类型稠油油藏的开发方案设计，经过艰辛之路，深知技术及经验来之不易。展望未来，注蒸汽（包括注热水）热力开采技术必将继续发展，仍然是稠油油藏提高采收率的主要方法。为此，有必要将我国自己的研究成果及经验较系统地总结，这就是作者的心愿。

本书是用了三年时间写成的，原稿引用资料很多，内容较细，经反复删节压缩后定稿。针对稠油油藏开发中的主要问题，共分十四章。概括起来，主要讨论了以下问题：

(1) 什么样的原油称为稠油？为什么将我国的稠油分为普通稠油、特稠油和超稠油三类，而国际上只分普通稠油及沥青两类？

(2) 哪些稠油油藏能够采用注蒸汽热力开采，哪些在目前技术经济条件下还不能有把握地开采。即稠油油藏注蒸汽开采筛选标准及地质储量分级评价标准。

(3) 哪些普通稠油油藏不能采用普通水驱开采，地下原油粘度及油水粘度比对水驱油效率的影响程度如何？

(4) 稠油油藏注蒸汽热采的理论基础。

(5) 稠油油藏由勘探走向商业性开发的程序及开发方案如何设计。

(6) 蒸汽吞吐开采方法的机理、工艺参数优选方法。

(7) 我国不同类型稠油油藏采用蒸汽吞吐方法开采的实践经验。

(8) 蒸汽驱采油机理、油藏地质条件的适用性及注采工艺优选方法。

(9) 导致蒸汽驱开采效果变差的原因、改善蒸汽驱效果的途径及技术。

(10) 深井注蒸汽减小井筒热损失、提高井底蒸汽干度，并保护套管的主要技术。

(11) 稠油注蒸汽开采经济评价方法。

(12) 稠油注蒸汽开采技术的发展前景。

本书针对我国稠油油藏的特点及技术难点，主要阐述了我国的研究成果及经验，同时引

用了某些国外学者的研究成果及油田经验。作者也注意了编著本书的理论性、实用性、资料性及使用中的可操作性，便于科技人员及现场工程技术人员作参考。

本书第四章由刘尚奇编写，有些计算数据是刘尚奇、谢培功、张建等提供的，还有许多同志提供了参考资料，在此一并致意感谢。由于作者水平所限，书中难免存在某些错误及不妥之处，敬请读者指正。

作　者

一九九五年十二月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　　录

第一章　概论…… (1)
　第一节　概况…… (1)
　第二节　我国稠油热采技术的发展历程…… (2)
　第三节　主要技术成就…… (4)
　第四节　主要技术论点及思路…… (6)
　第五节　热采技术的发展前景…… (8)
　参考文献…… (9)
第二章　稠油的特性、定义及分类标准 …… (10)
　第一节　我国稠油的一般特性 …… (10)
　第二节　国际上对重质原油的分类标准 …… (21)
　第三节　我国稠油的分类标准 …… (23)
　第四节　稠油油藏温度、原油粘度的测定方法 …… (25)
　第五节　稠油分类作业方法及实例 …… (30)
　参考文献 …… (33)
第三章　蒸汽、水、油及油藏岩石的热特性 …… (34)
　第一节　蒸汽、水的热物理特性和特性参数计算方法 …… (34)
　第二节　原油及天然气的热物理特性 …… (67)
　第三节　油藏地层岩石的热特性 …… (87)
　第四节　油藏岩石热特性参数在注蒸汽采油工程中的应用…… (102)
　参考文献…… (105)
第四章　油层注蒸汽加热过程…… (106)
　第一节　油层注蒸汽加热机理…… (106)
　第二节　油层加热的能量平衡方程…… (107)
　第三节　油层注蒸汽加热计算方法…… (120)
　第四节　注蒸汽过程的热能管理…… (124)
　第五节　计算实例…… (127)
　参考文献…… (133)
　附录　余误差函数表…… (134)
第五章　井筒热损失、套管温度及井底蒸汽干度计算方法…… (135)
　第一节　井筒传热机理…… (135)
　第二节　井筒总传热系数的计算方法…… (137)
　第三节　用物理模拟方法确定井筒总传热系数的方法…… (144)
　第四节　影响井筒隔热效果的主要因素…… (156)
　第五节　实际应用中对井筒总传热系数的修正方法…… (160)
　第六节　井筒总传热系数 U_{to}对井底注热参数的影响 …… (162)

第七节　井筒传热数值模拟方法…… (166)
第八节　井口注汽工艺参数对井底注热参数的影响…… (171)
符号说明…… (174)
参考文献…… (176)
第六章　稠油油藏注蒸汽开采筛选标准及储量评价方法…… (178)
第一节　稠油蒸汽吞吐筛选标准…… (179)
第二节　稠油油藏注蒸汽（蒸汽吞吐及蒸汽驱）筛选标准…… (186)
第三节　稠油地质储量的分等评价方法…… (202)
第四节　稠油勘探及开发初期取资料要求…… (203)
参考文献…… (205)
第七章　稠油油藏工程研究及注蒸汽开发方案设计…… (206)
第一节　稠油注蒸汽热采工程的特点及技术策略…… (206)
第二节　稠油油藏工程研究的主要任务及主要内容…… (210)
第三节　稠油油藏热采开发程序…… (213)
第四节　稠油油藏开发方案设计…… (217)
第五节　蒸汽驱先导试验的方案设计与实施…… (230)
参考文献…… (234)
第八章　蒸汽吞吐采油方法…… (235)
第一节　蒸汽吞吐采油原理…… (235)
第二节　蒸汽吞吐生产动态计算方法…… (243)
第三节　油藏地质参数对吞吐效果的影响…… (247)
第四节　注蒸汽工艺参数对吞吐效果的影响…… (257)
第五节　蒸汽吞吐采油的技术策略…… (267)
参考文献…… (278)
第九章　我国稠油油田蒸汽吞吐开采的实践经验…… (279)
第一节　高升油田——我国注蒸汽开采最深的稠油油田的实践经验…… (279)
第二节　深层中薄互层稠油油藏蒸汽吞吐开采的实践…… (294)
第三节　具有边、底水的深层中厚互层稠油油藏蒸汽吞吐开采的实践…… (307)
第四节　深层中厚互层稠油油藏蒸汽吞吐开采的实践…… (313)
第五节　浅层单砂体层状稠油油藏——克拉玛依九区蒸汽吞吐开采的实践…… (319)
第六节　薄油层、特稠油、超稠油及低渗透稠油油藏蒸汽吞吐开采的实践…… (331)
第七节　稠油蒸汽吞吐开采的经验小结…… (342)
第十章　蒸汽驱开采方法…… (348)
第一节　蒸汽驱采油机理…… (348)
第二节　蒸汽驱及热水驱室内实验结果…… (354)
第三节　油层加热过程中渗透率变化的试验研究…… (364)
第四节　油藏地质特性对蒸汽驱效果的影响及对策…… (369)
第五节　蒸汽驱开采过程中注汽及采油工艺参数的优选…… (381)
第六节　完善、发展新工艺技术，为汽驱开采创造成功的条件…… (390)
参考文献…… (392)

第十一章　我国不同类型稠油油藏蒸汽驱先导试验的初步实践…… (394)
第一节　克拉玛依九区浅层稠油油藏蒸汽驱生产动态…… (394)
第二节　具有边水的深层块状稠油油藏蒸汽驱先导试验生产动态…… (413)
第三节　曙光油田杜 163 区——薄互层状稠油油藏蒸汽驱先导试验…… (422)
第十二章　改善蒸汽驱开发效果的技术策略…… (429)
第一节　保持蒸汽驱开采过程采注比大于 1.0 是形成正常蒸汽驱的基本条件…… (429)
第二节　由蒸汽吞吐转入蒸汽驱的最佳时机…… (437)
第三节　深井蒸汽驱提高井底蒸汽干度的方法…… (448)
第四节　分层注汽技术…… (453)
第五节　控制蒸汽窜流，提高扫油体积系数的方法——蒸汽泡沫段塞驱…… (458)
第六节　蒸汽驱开采过程中的注采动态调整方法…… (470)
参考文献…… (486)
第十三章　注蒸汽热采经济分析方法…… (489)
第一节　热采方案常用经济指标的计算方法…… (489)
第二节　热采项目中的投资费用和生产费用计算方法…… (497)
第三节　热采经济评价的步骤和程序…… (500)
第四节　经济评价实例…… (502)
第五节　稠油油藏注蒸汽开采的经济极限油汽比…… (512)
第十四章　注蒸汽热采油井完井技术…… (518)
第一节　高温下油井套管热应力损坏机理及套管耐温极限…… (518)
第二节　套管预应力完井方法…… (523)
第三节　耐高温水泥固井技术…… (528)
第四节　稠油油井完井方法…… (534)
第五节　热采井套管损坏实例分析及防治措施…… (545)
参考文献…… (548)

第一章　概　　论

石油资源存在于天然形成的油藏之中，其开采技术随油藏类型、原油特性不同而不同。稠油，也称重油即高粘度重质原油，由于在油层中的粘度高，流动阻力大，甚至不能流动，因而用常规技术难以经济有效地开发。最近十几年，我国采用注蒸汽热采技术，有效地开发了一批稠油油田，打开了稠油开发的新局面。本章简要概述了我国稠油开发的概况、发展历程、主要的技术成就及发展潜力，也概述了本书主要的技术论点及思路。

第一节　概　　况

一、我国稠油的特点

国际上常称稠油为重油及沥青，其突出的特点是沥青胶质含量高，一般含蜡量较少，因而原油粘度很高，流动困难，开采难度很大。我国稠油的特点是胶质成分多，一般 20％～40％，沥青含量较少，一般 0～5％，因而和国外的稠油相比，粘度高，而相对密度低。按作者推荐的分类标准，以油层条件下或油层温度下的脱气原油粘度为主，参考密度为辅分类，在 50mPa·s 以上（密度大于 0.9200g/cm^3）称为稠油。其中粘度在 50～10000mPa·s（密度大于 0.9200～0.9500g/cm^3）称为普通稠油；10000～50000mPa·s（密度大于 0.9500～0.9800g/cm^3）称为特稠油；大于 50000mPa·s（密度大于 0.9800g/cm^3）称为超稠油或天然沥青。

我国稠油中的含硫较低，一般小于 0.5％；轻馏分（300℃）约为 10％左右。金属钒、镍含量低。也有少数油藏，原油中沥青胶质含量、石蜡含量均较高，在油层中原油粘度大于 50mPa·s，也划为稠油油藏。那种沥青胶质含量低、含蜡量高、凝固点高的原油和在油层中的粘度小于 50mPa·s的原油不能称为稠油，而称为轻质原油。

二、我国稠油资源的分布及特点

我国稠油资源的分布很广，储量丰富、陆上稠油、沥青资源约占石油总资源量的 20％以上。目前已在 12 个盆地发现了 70 多个稠油油田。

我国陆上稠油油藏多数为中新生代陆相沉积，少量为古生代的海相沉积。储层以碎屑岩为主，具有高孔隙、高渗透、胶结疏松的特征。稠油与常规油常有共生关系，受到二次运移中生物降解及氧化等因素影响，在一个油气聚集带中，从凹陷中部向边缘逐渐变稠。重质油主要分布在盆地边缘斜坡带，凸起边缘、低凸起之上或凹陷中断裂背斜带的浅层。陆相重质油，由于受成熟度较低的影响，沥青含量较低，而胶质成分高，因而相对密度较低，但粘度较高。目前，稠油储量最多的是东北的辽河油区，其次是东部的胜利油区和西北的新疆克拉玛依油区。

三、稠油油藏特点

我国的稠油油藏具有陆相沉积的特点，油层非均质性严重，地质构造的断层多，而且油藏类型很多，埋藏深。深度大于 800m 的稠油储量约占已探明储量的 80％，其中约有一半油藏的埋深在 1300～1700m。已投入开发的油藏类型有：(1) 有气顶的块状厚层油藏；(2) 具

有边底水的多层油藏；(3) 薄互层油藏；(4) 单砂体层状岩性油藏；(5) 单砂体薄层油藏；(6) 边底水活跃的块状厚层油藏；(7) 夹有大卵石的砂砾岩油藏。这就意味着注蒸汽开采的技术难度极大。

四、热力采油技术发展迅速

蒸汽吞吐技术已经成为稠油商业性开采的主要方法，深井蒸汽吞吐开采技术已经配套，并具有自己的特色。不同类型油藏的蒸汽驱先导试验也在进行中，蒸汽驱开采技术正在完善、配套和提高。1986 年，蒸汽吞吐作业 425 井次，产量 150×10^4t；1990 年热采油井超过了 3800 口，蒸汽吞吐作业达到 4600 井次，产油量达到 830×10^4t；1993 年，在 6200 多口油井中进行了 7800 井次蒸汽吞吐作业，有 200 多个井组正在进行蒸汽驱试验，稠油产量达到 1139×10^4t，其中热采产量 1066×10^4t；到 1995 年，热采吞吐油井 8100 多口，吞吐产油 1051×10^4t，汽驱油井 820 多口，汽驱产油 48×10^4t，冷采产油 197×10^4t，合计稠油产量 1296×10^4t。

第二节　我国稠油热采技术的发展历程

1958 年，在我国新疆准噶尔盆地西北缘断阶带发现了乌尔禾—夏子街浅层稠油带，打井 48 口，发现两个浅层稠油层，分布面积几十平方公里，在克拉玛依黑油山可以看到浅层稠油露头油砂。这种稠油粘度高，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。接着 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，原油粘度 10000mPa·s。汽驱 1 年 5 个月，原油采收率高达 68%，累积油汽比 0.115t/t；如按高峰末期，采收率约 60%，油汽比为 0.148t/t。以后又在其他浅层油井进行蒸汽吞吐开采。到 1980 年底，共进行了 47 井次吞吐作业（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”1981.5），拉开了我国稠油热采的序幕。

1966 年～1967 年，在原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，原油粘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，因而在原石油工业部领导的重视及具体组织下，以东部为主攻地区，也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、加拿大等国部分先进的技术设备，主要依靠我国自己的技术，开始了我国稠油开发技术的崭新的开发时期。

从 1980 年到目前，我国稠油开发技术的发展大致经历了三个阶段，即：1980 年—1985 年，以稠油蒸汽吞吐开采技术为目标；1986 年—1990 年，以稠油蒸汽吞吐技术推广应用与稠油蒸汽驱先导试验为目标；1991 年—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、新

疆、胜利、河南油田及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，辽河油田与总公司勘探开发研究院密切合作，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 1600 m 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。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“双摸”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，剧增到 50 t/d 以上，少数油井甚至达到 80 t/d 以上，因而很快推广应用到许多新油田。

1985 年，全国（辽河、新疆克拉玛依、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，年油汽比 1.36 t/t。1986 年，蒸汽吞吐作业 425 井次，热采产量 150×10^4 t，年油汽比 1.67 t/t。到 1990 年，全国（辽河、新疆克拉玛依、胜利、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 %。

历年稠油注蒸汽热采产量见表 1—1 及图 1—1。

图 1—1　全国历年稠油产量增长曲线

需要全本请访问 www.ertongbook.com

表 1—1　全国历年稠油热采产量

项目 \ 年份	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
吞吐井次，口	229	425	1104	2032	3164	4358	6775	7220	9229	8131	8964
稠油产量，10^4t	105.8	295.0	407.7	532.5	671.5	839.9	941.2	1056.1	1189.2	1253	1298
热采产量，10^4t	75	150.0	296.7	455.8	596.5	733.4	837.7	958.0	1066.2	1129.8	1100
年油汽比，t/t	1.36	1.67	1.27	0.93	0.72	0.68	0.62	0.58	0.50	0.52	0.61

注：稠油产量中包括投入注蒸汽热采产量及部分油井常规冷采产量，不包括已注水开发的稠油油田产量。1994 年蒸汽吞吐及汽驱井 8131 口，1995 年增至 8964 口。

我国稠油开发，从 1982 年油层最深的高升油田（深度 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 年累积产量达 6000×10^4t，其中热采产量 5200×10^4t。从 1985 年起，平均每年增长 136×10^4t。同时经济效益十分显著，先后建成了辽河、新疆、胜利、河南等 4 个稠油生产基地及北京石油勘探开发科学研究院稠油热采研究中心，为我国稠油开发作出了贡献。

最近十年，稠油开发以蒸汽吞吐开采技术为主要方法。常规冷采产量仅有 100×10^4t/年左右。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。蒸汽驱开采仍在进行工业性试验及技术发展、完善阶段。

第三节　主要技术成就

总结起来，稠油热采有十项重大技术成就[1]，这些技术具有我国自己的特色。

一、油藏描述技术取得很大进展

我国的稠油油藏具有陆相沉积的特点，油层非均质性严重，地质构造的断层多，而且油藏类型很多，原油性质变化大。不断深化对油藏地质体分布的认识，对于改善注蒸汽开采效果是非常重要的。

几年前对河南井楼一区稠油油藏，采用地质、测井、三维地震资料综合研究方法，成功地进行了精细油藏描述[2]，并编制成软件包。对油藏地质构造形态，地质参数，油、气、水层分布，地质沉积相态变化和油气富集区等有了详细的认识，在此基础上确定热采开发设计方案的效果好。最近几年，在四个稠油油区利用计算机进行了九个稠油油藏精细描述示范区工作。在提高开发方案设计水平及调整开发动态中取得了良好的效果。

二、热采数值模拟及物理模拟技术在稠油开发中发挥了重要作用

在新油藏的开发设计方案中推广采用上述“双模”技术，优化井网井距、开发方式及注采工艺参数。对已投入开发的油藏，采用多井组数值模拟方法进行蒸汽驱生产动态跟踪模拟分析，优化调控措施，收到了很好的效果。利用 CMG 的 STARS 软件，研究采用水平井热采技术开发特稠油及超稠油取得了重要成果[3]。获得了适宜水平井热采的油藏筛选标准，

尤其是原油粘度、油层厚度及垂向/水平渗透率比值等经济极限值。此外，针对辽河油区冷家铺特稠油利用水平井热采进行了开发设计方案。研究结果及辽河、胜利油田已完成的16口水平井热采结果表明，这种新技术有很好的发展前景。

三、深井井筒隔热及保护套管技术

自行设计的三型隔热油管已成批地在两个工厂制造，这种隔热油管的结构与美国 Thermal caceⅢ型隔热油管相似。接头处有隔热套，预应力结构，双层管中充有超细矿物棉隔热材料，抽真空后充有氮气并有吸气剂。这种国产隔热油管的价格远低于进口产品，已在300～1700m的注汽井中广泛应用。金属密封耐热封隔器是辽河油田的重大发明。耐温高达350℃，压力差17MPa，可以在一口井中下入两个封隔器进行分层注汽。它的使用成功率、耐久性及可靠性都比其他类型的耐热封隔器优越，尤其适用于深井蒸汽驱。预应力套管完井技术也广泛地用于400～1700m深度的油井。实践证明，这是保护套管最经济的方法。模拟研究结果表明，如果4″隔热油管与7″套管之间环空充满氮气，井筒总传热系数将由环空充满水时的28W/（m^2·K）降至10W/（m^2·K）。在辽河油区深井注汽作业中，采用环空注入氮气的经验也证明这是一种最好的保护套管及减小井筒热损失的方法。以前有些深井注汽过程中环空中有水存在，造成了套管损坏的故障。

四、丛式定向井及水平井钻采技术

在辽河及胜利油区的稠油油田已广泛采用丛式定向井钻井及蒸汽吞吐采油。丛式油井总数已达1000口以上。水平井热采技术有了突破性发展。在油藏工程研究、数值模拟、三维相似物理模拟、钻井工程及采油工程等方面进行了大量研究工作。在辽河油区及胜利油区已完钻16口水平井，最长的水平段长445m。水平井蒸汽吞吐采油效果好于垂直井3～4倍。例如，胜利乐安油田，产层砂砾岩，深度920～970m，油层厚度6～10m，原油密度0.97～1.03g/cm^3，原油粘度10000～43000mPa·s。在直井中蒸汽吞吐前三个周期的平均单井产量为13t/d，油汽比为0.76，平均周期125d，周期产量1777t。第1口水平井N020—1，前三个周期的平均产量为57t/d，油汽比1.6，平均周期172d，平均周期产量9769t。水平井与垂直井相比，单井产量高3.4倍，周期产量高4.5倍。1993年，4口水平井蒸汽吞吐采油的产油量达到233t/d。

五、稠油油井防砂技术

在4个稠油油区广泛采用了先期砾石填充绕丝衬管防砂及套管内砾石填充绕丝筛管防砂技术。为了解决油井产细粉砂的问题，试验成功并推广采用了高温化学固砂剂防砂新技术。化学固砂剂可以耐温350℃，施工作业简单，成本低，效果好。例如，辽河油区施工190口井，防砂有效率达93.5%。平均检泵周期由防砂前的13d，延长至159d，产液中含砂由0.1%减至含砂痕迹。河南油田采用不锈钢丝棉防砂衬管技术，作业54井次，防砂有效率达100%，经验证明它是另一种防止细粉砂的好方法。

六、分层注汽及注入化学剂助排技术

许多油藏蒸汽吞吐开采过程中，吸汽剖面厚度仅占1/3～1/2。为了扩大垂向注汽厚度，改善吞吐效果，辽河油区已试验成功两种分层注汽新技术。一种是采用耐高温（350℃）、高压差（17MPa）的金属密封封隔器及相配套的井下工具进行分层注汽。在7″套管中下入隔热管柱及一个或两个封隔器，分为2个或3个注汽层段，迫使蒸汽注入以前未进汽的层段。另一种方法是注汽过程中投入特制的塑料球，将吸汽量多的射孔孔眼堵住，进行选择性注汽。这两种分层注汽技术，已在辽河油田的142口井中推广应用。此外，在蒸汽吞吐作业中，还

推广应用薄膜扩散剂、增油排水剂、降粘剂等高温化学剂，可以增加吞吐周期的产油量及排出水量。

七、稠油热采油井机械采油技术

长冲程链条抽油机（5～8ｍ）及12～16型游梁式抽油机（5～6ｍ）、各种适用于高粘度稠油热采的深井泵及高强度抽油杆已配套推广应用。空心抽油杆柱中热水循环及电缆加热技术，可以使高粘度稠油或高凝原油生产井井筒加热降粘，这项新技术已在数百口油井中推广应用，取得良好效果。

八、井下高温测试技术

适用于注汽井、生产井及观察井的井下温度、压力及注汽、采油剖面测试设备、仪器及工艺已基本配套。辽河油田研制的温度、压力双参数测试仪适用于深井注汽温度350℃及16ＭPa的注汽井。

九、注蒸汽专用锅炉及热采井口设备

国内已有三个锅炉制造厂成批制造6t/h，9.2t/h，11.5t/h及23t/h注蒸汽用专用锅炉，能满足稠油注蒸汽热采需要。到1993年止，全国在用注蒸汽锅炉已达200多标准台（23t/h），既有运移性好的车装式，又有固定安装的撬装式。耐温370℃、耐压27ＭPa的热采井口已完全在国内生产。还有地面蒸汽分配，计量技术，注汽管网隔热技术等。

十、稠油集输、计量、脱水处理及输送技术

总体上讲，稠油注蒸汽热采技术发展迅速，取得了很大成就。目前，还面临许多重大技术难题，仍需继续改善、发展。

第四节　主要技术论点及思路

我国稠油油藏具有陆相沉积特点及多种类型的复杂性，尤其是多数油藏埋藏深度超过1000ｍ，对注蒸汽热采技术造成的难度之大，要求之高，实属罕见。虽然我们借鉴和引进了国外某些适用技术设备和经验，但主要依靠了我们自己的技术力量取得了开拓性的创造和发展。今后仍面临的技术上及经济效益上的严重挑战，仍需迎难而上，开拓新领域，创出高水平。

(1) 要改变对稠油的传统认识，建立新概念，采用新技术。作者在1983年初曾提出10个改变（即建立新概念，采用新技术，打开稠油开发新局面），实践证明基本正确。但需强调：①改变稠油难采、见稠就怕的认识，建立见稠不怕，稠油可采，稠油油藏优于深层低渗透油藏的概念；②不能沿用轻质油藏的传统开采方法，更不可未经可行性研究及先导试验，就投入注水开发；③改变常规轻质油油藏的勘探评价方法，强调取心、热采方法试油及按热采筛选标准评价；④改变旧的传统完井方法，采用新的稠油完井、射孔、防砂技术；⑤按稠油类别及油藏类型采用“双模”技术，选择最适用、经济效益又好的开发方案；⑥按照稠油特点，采用适用的机械采油方法；⑦稠油地面工程按采、集、输、炼相结合，提高整体效益为目标综合考虑。

(2) 作者提出的以油层条件（温度）下粘度为主的稠油分类标准[4]将稠油分类为普通稠油、特稠油及超稠油三种是适用的，既参考了国际分类标准，又考虑了我国稠油的特点。不能将高凝原油混为稠油。

(3) 深油层注蒸汽开发必须解决既要保护油井套管不致热应力损坏，又要减少井筒热损

失，提高井底蒸汽干度，这是关键的难题。其技术路线是采用高质量的预应力套管完井技术及井筒隔热技术，我国的油藏条件不适宜采用井底蒸汽发生器的技术发展方向[5]。对于超过 500m 的深井，采用井筒隔热油管及耐热封隔器，环空水难以完全蒸发排干，隔热效果难以达到要求。作者推荐采用活动式制氮机连续向环空充氮技术，甚至向油层注入大量氮气，既保护套管，又扩大加热带、助排增效。

(4) 新发现的稠油油田，从勘探走向开发，要密切衔接，步伐可以加快，合理的程序不可超越。通过取心、单井蒸汽吞吐试验、热采可行性研究及先导性热采试验等主要程序，评价、筛选出有经济效益的储量才可投入商业性开发。但也不可仅考虑常规热采工艺技术，要按油藏地质特点，立足于发展实用的高新技术，拓宽开发领域。

(5) 稠油油藏的非均质性是客观存在，必须不断深化认识油藏地质特征。尤其要注意油层厚度及纯总厚度比，原油粘度、孔渗饱物性参数、隔层及水层等在纵向及平面上的变化规律。

(6) 数值模拟及物模技术是稠油油藏注蒸汽热采开发方案设计的主要手段，新方法、新技术来自室内物理模拟实验及数值模拟研究，评价结论来自先导试验。

(7) 稠油油藏的开发，总体上要将常规开采、蒸汽吞吐开采及蒸汽驱开采几个阶段衔接起来考虑。既使对暂时不能转蒸汽驱开采的油藏，也不可打乱开发系统，要有进一步提高开发水平（采收率）的余地。

(8) 稠油油藏蒸汽吞吐阶段，除了特、超稠油油藏特殊需要外，不宜超高压、超高速注汽，要防止油层压裂，导致蒸汽窜流。为此，必须要有限定注汽压力及速度的措施，优选注汽工艺参数。

(9) 稠油油田的开发要以经济效益为目标，而经济效益要依靠发展新技术。否则，许多油藏将无法或仅能蒸汽吞吐开发，浪费大量地下石油资源。作者推荐发展：①注蒸汽锅炉尽量国产化，大幅度降低成本；②以煤代替原油作燃料，改造现有锅炉烧水煤浆或煤粉，研制大型烧煤注汽锅炉，力争将蒸汽成本降低　左右；③加强注热系统的热能管理，降低热损失；④减少无效作业，改善近井地带渗流条件，提高单井产量；⑤采用高质量隔热管、环空注氮气保护油井套管，降低损坏率；⑥开发多井眼侧钻技术；⑦发展垂向调剖及层内深度调剖等技术，尤其是注氮气泡沫扩大波及体积新技术。

(10) 地质条件适宜蒸汽驱开采的油藏，要采用配套、实用、先进的技术，适时由蒸汽吞吐开采转入蒸汽驱开采。作者认为存在一个最佳转驱及极限转驱时机。一般在蒸汽吞吐第 4～5 周期转入汽驱后，生产井继续吞吐引效，产量接替较好，汽驱效果也好；如在极限条件下转汽驱，将导致汽驱失败，降低整体开发水平。

(11) 今后几年，稠油产量仍将以蒸汽吞吐开采为主，调整、扩大垂向吸汽剖面，打加密井继续吞吐开采仍有很大潜力。但多数不能正常转汽驱采油的油藏，在加密吞吐开采之后，转入不规则井网汽驱开采是必然趋势，因为井间残留的死油区只能靠汽驱才可有效动用。

(12) 水平井热采技术是今后的主攻方向，尤其适用于特、超稠油油藏和边底水活跃油藏。

(13) 稠油油藏在蒸汽吞吐开采之后，能否成功地转入蒸汽驱或热水驱开采，既要考虑现有工艺技术水平，又要着眼于发展新工艺新技术。既要有发展战略及对策，更要加快研究试验“硬件”技术，尤其是层内调剖、控制汽窜技术。

(14) 已进行注水开发的普通稠油油藏，进一步采用多种注热开采技术，能够大幅度提高采收率。

(15) 某些轻质油藏，在水驱后期，存在采用热采技术大幅度提高采收率的潜力。

第五节　热采技术的发展前景

今后热采技术将继续加快发展。某些蒸汽吞吐开采油藏将陆续转入蒸汽驱或热水驱，还有某些新油藏将投入开发。稠油产量将继续稳定增长。技术开发的重点是:

(1) 发展高效蒸汽吞吐开采技术。主要是采用分层注汽技术，多功能化学剂调整控制吸汽剖面、选择性封堵蒸汽窜流通道，提高垂向油层动用程度。目标是提高蒸汽吞吐开采的采油量、油汽比、采收率，延长开采期。

(2) 发展封堵、控制蒸汽窜流的技术，提高蒸汽驱的效果。深度超过 800 m 的油藏，由蒸汽吞吐转入蒸汽驱，关键问题是继续完善井筒隔热技术以提高井底蒸汽干度，保证在 50 % 以上；有效地控制蒸汽及热水窜流。

(3) 发展水平井热采技术以开发特殊油藏及特、超稠油油藏。

(4) 发展新技术，改善已注水驱的普通稠油油藏的开发效果。这类油藏的原油粘度一般在 50～200 mPa·s，由于粘性指进严重，水驱的采收率低，含水上升快，水驱采收率一般不超过 20 % ，有很大的生产潜力。

(5) 开发提高注蒸汽热采经济效益的新设备、新技术。主要是以煤代油的注蒸汽锅炉、大幅度降低热能的开发模式、蒸汽吞吐开采后期提高采收率的方法和低耗能汽驱开采技术等。

参 考 文 献

[1] Liu Wenzhang. Review of Thermal Recovery Technology in China. Presented at the 5Th UNITAR International Conference on Heavy Crude and Tar Sands. Caracas, Venezuela. August 1991

[2] Wang Jixian and Lin chunzeng. A Description of The Jinglou Anticlinal Reservoir in The Henan Oil Field —— The Application of Fuzzy Mathematics in Reservoir Description. Presented at the 5th UNITAR/ UNDP International Conference on Heavy Crude and Tar Sands, Caracas, Venezuela, August. 1991

[3] Liu Shangqi. Thermal Recovery of a Super Heavy Oil Reservoir with Horizontal Wells. presented at The First International Seminar: Improvements in Practices of Oil and Gas Exploitation. Lima, peru, Nov. 1993

[4] 刘文章. 关于我国稠油分类、热采筛选标准及储量分等问题的研究. 石油工业标准化 (季刊), 1985 年第 2 期

[5] Liu Wenzhang. The Status of Thermal Recovery Technology in China. Presented at The Second UNITAR/ UNDP International Conference On Heavy Crude and Tar Sands, Caracas, Venezuela, Feb. 1982

需要全本请访问 www.ertongbook.com