

复杂油藏物理法、物理—化学复合法
强化开采理论与技术丛书

卷四

稠油波动—化学低温 裂解降黏理论与技术

◎ 蒲春生 王步娥 著

石油工业出版社



中国石化出版社
中国石化出版社
中国石化出版社



稠油流动—化学低温 裂解降粘理论与技术

● 张德胜 王力军 编

中国石化出版社

复杂油藏物理法、物理—化学复合法强化开采理论与技术丛书（卷四）

稠油波动—化学低温裂解降黏 理论与技术

蒲春生 王步娥 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书为《复杂油藏物理法、物理—化学复合强化开采理论与技术丛书》的第四卷,全面系统地介绍了波动辅助化学催化裂解降黏提高稠油注蒸汽开发效果的基本理论与关键技术。

本书可供从事油气田开发工程、环境工程、油田化学和石油化工等方面的科研工作者与工程技术人员参考,也可以作为相关专业领域的博士、硕士研究生和高年级大学生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

稠油波动—化学低温裂解降黏理论与技术 / 蒲春生, 王步娥著.
北京: 石油工业出版社, 2014.12
(复杂油藏物理法、物理—化学复合强化开采理论与技术丛书; 4)
ISBN 978-7-5183-0321-2

I . 稠…
II . ①蒲…②王…
III . 稠油开采—裂解
IV . TE345

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 239951 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
编辑部: (010) 64523541 发行部: (010) 64523620
经 销: 全国新华书店
印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 34
字数: 780 千字

定价: 140.00 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

序

稠油储量极其丰富，随着全球社会经济发展对石油能源需求量的不断增加，稠油资源的高效开发利用在石油工业中的地位越来越重要。

稠油注蒸汽层内化学辅助裂解降黏技术是近年来出现的一种稠油油藏新型开发技术，在注蒸汽开采稠油过程中加入化学催化剂，以辅助加快稠油在蒸汽作用下发生的开环、脱硫等一系列水热裂解反应，从而大大降低稠油黏度，长效改善稠油品质，提高稠油产量和采收率。

稠油注蒸汽层内化学辅助裂解降黏开采技术把孔隙介质作为天然化学“催化反应器”，在井下对整个沸点范围的稠油都进行水热裂解处理，改善稠油质量，降低从地下到炼制中心炼厂的举升及运输成本。此外，层内化学辅助裂解降黏开采稠油技术还具有其他的优点，如采用的催化剂无毒、无污染，安全可靠；与注入的蒸汽有较好的配伍性；施工工艺简单，在现有的注蒸汽条件下即可进行现场操作等。因此，“稠油注蒸汽化学辅助层内催化裂解降黏开采技术”是继蒸汽吞吐、蒸汽驱之后稠油开采技术的一个重要发展方向，具有十分广阔的应用前景。

近15年来，在前人研究基础上，蒲春生教授带领的科研团队一直坚持在这一领域坚韧地跋涉，取得了一系列国际领先的重要成果。本著作系统地阐明了稠油注蒸汽层内化学辅助裂解降黏技术的研究现状，从宏观及微观角度对稠油注蒸汽层内化学辅助裂解降黏机理进行了更加全面的认识，研发了适合我国主要稠油油区层内化学催化裂解降黏的系列化学催化剂及其配套助剂，创造性地将物理法采油中的低频脉冲波和超声波等技术引入到稠油注蒸汽层内化学辅助裂解降黏技术中，系统研究揭示了波动—化学辅助稠油注蒸汽水热裂解降黏的物理化学协同作用机制与主要影响因素，建立了油藏工程优化设计方法和矿场工艺技术。为油田的实际矿场应用提供了科学的理论指导。

本书是迄今为止第一部系统阐述波动化学耦合作用的稠油水热催化裂解理论与技术的专著，是从事稠油高效开发、稠油降黏技术、稠油开发地质等方面的科研工作者和技术人员很好的参考书。同时，本书的出版也必将对相关学科领域的理论与技术研究起到重要的推动作用。

中国工程院院士

韩大匡

2014年5月30日

前 言

当前,我国石油天然气产量的增加与国民经济的快速发展形成了尖锐的矛盾,东部地区的大庆、胜利、辽河、大港等老油田基本上都已陆续进入注水开发的中、高含水期,面临油田含水逐年升高、原油产量不断下降的难题。新发现并投入开发的油田绝大多数属于低渗透、特低渗透、稠油、超稠油等难动用油藏,而且这些新增原油储量大部分处于生态环境脆弱的中西部沙漠、戈壁、黄土高原、滩海和深海地区,储层类型多、埋藏深、地质条件复杂、地理条件恶劣,多数油藏为低渗透、特低渗透和稠油、超稠油,整体采收率低,资源浪费严重,开发成本很高,技术难度极大。同时,这些地区的生态环境极为脆弱,给油田的开发带来严重的困难。因此,如何在不断发展、完善油田现有开发及采油工艺技术的基础上,加快寻找、研究和发展一些效果好、成本低、不污染油层以及对生态环境不造成破坏的原油增产与提高采收率新技术和新方法,最大限度地提高难动用原油储量的产量和原油的采收率,保护油层和生态环境,降低综合成本,提高整体经济效益与社会效益,正逐步成为我国石油科技工作者共同关注的问题。物理法强化采油技术和物理-化学复合法强化采油技术就属于这类新方法。研究开发适合我国难动用油藏实际的高效低成本物理法强化开采和物理-化学复合法强化开采与提高采收率新技术具有十分重要的意义。

物理法强化开采技术利用大功率声波、超声波、电磁波、电液脉冲波、爆燃气体高压冲击波等物理场来处理激励油气储层,以实现注采井的增产增注和提高油藏整体采收率,具有效果好、适应范围广、工艺简单、成本低廉、不污染油层与生态环境等特点,是近年来低渗、特低渗、稠油、超稠油等难动用油藏高效开发的一个十分重要的发展方向。物理-化学复合法强化采油技术就是将各种物理场对油藏的激励作用和化学处理剂对油藏的化学作用有机地结合起来而形成的高效复合采油增产与提高原油采收率的新技术。1987年以来,笔者所带领的科研项目组针对我国低渗透、特低渗透、稠油、超稠油以及中、高含水等难动用油藏实际,一直致力于储层液-固体系微观动力学、储层波动力学、储层伤害孔隙堵塞预测诊断与评价、波场强化采油、电磁波强化采油、高能气体压裂强化采油等领域的基本理论与工程应用方面的学习和研究工作,并逐步将低频水力脉冲波、声波、超声波、电磁波、电液脉冲以及高能气体压力波与化学强化采油技术相结合,系统地研究物理-化学复合强化采油理论与技术。特别是近10年来,项目组的研究工作被列入了国家西部开发科技行动计划重大科技攻关课题“陕甘宁盆地特低渗油田高效开发与水资源可持续发展关键技术研究”(2005BA901A13),国家科技重大专项大型油气田及煤层气开发(项目编号:

2008ZX05009), 国家 863 计划重大导向课题“超大功率超声波油井增油技术及其装置研究 (2007AA06Z227), 国家 973 计划“中国高效气藏成藏理论与低效气藏高效开发基础研究”三级专题“气藏气-液-固体系微观动力学特征”(2001CB20910704), 国家自然科学基金“油井燃爆压裂中毒性气体生成与传播规律研究”(50774091), 国家自然科学基金“延时式可控高能气体压裂技术动力学机理研究”(51104173), “低渗油藏低频谐振动辅助表面活性剂驱油机理研究”(51274229), 山东省自然科学基金“稠油热波耦合辅助层内催化化学催化裂解降黏技术研究”(ZR2010EM014), 教育部重点科技攻关项目“振动-化学复合增产技术研究”(205158), 中国石油天然气集团公司中青年创新基金项目“低渗油田大功率弹性波层内叠合造缝与增渗关键技术研究”(05E7038), 中国石油天然气股份有限公司风险创新基金项目“电磁采油系列装置研究与现场试验”(2002FX-23), 中国石油化工股份有限公司重大科技导向项目“稠油注蒸汽热波耦合催化裂解降黏技术研究”([2011] 075), 陕西省重大科技攻关专项计划项目“陕北地区特低渗油田保水开采提高采收率关键技术研究”(2006KZ01-G2)、“提高延长主力油层开发效果关键技术研究”(2011KJTZ01), 陕西省高等学校重大科技攻关项目“陕北地区低渗油田物理-化学复合增产与提高采收率技术研究”(2005JS04), 以及大庆、胜利、辽河、大港、长庆、延长油矿、塔里木、吐哈、吉林、中原等石油企业的科技攻关项目和技术服务项目, 使相关研究与现场试验工作取得了十分重要的进展, 获得了良好的经济效益与社会效益。在笔者及其合作者 20 年研究工作积累的基础上, 结合前人有关的研究工作, 形成了一套适合我国难动用油藏实际的高效低成本物理法和物理-化学复合强化开采与提高采收率基本理论与配套技术的基本框架, 总结撰写出了这套复杂油藏物理法、物理-化学复合法强化开采理论与技术丛书。在笔者 20 年的研究工作和本丛书的撰写过程中, 自始至终得到了郭尚平院士、王德民院士、韩大匡院士、戴金星院士、罗平亚院士、袁士义院士、李佩成院士、张绍槐教授、葛家理教授、张琪教授、李仕伦教授、陈月明教授、赵福麟教授等前辈们的热心指导与无私帮助。在此, 特向先生们致以崇高的敬意和由衷的感谢。

本书为丛书的第四卷, 全面系统地介绍了稠油注蒸汽层内波动-化学低温裂解降黏的基本理论与关键技术, 是复杂油藏物理法强化开采、物理-化学复合法强化开采的重要组成部分。

随着常规石油资源的不断减少与世界石油需求量的不断加大, 在油气资源中占有较大比例的稠油资源越来越受到重视。稠油的显著特点是密度大、黏度高、流动性差, 导致稠油在层内流动、井筒举升、地面集输以及炼制加工方面出现了很多困难。当前, 注蒸汽加热是国内外稠油开采的主要方式, 提高注蒸汽开发的效果是稠油开发整体效益的基本保证。

稠油注蒸汽层内化学催化裂解降黏技术是目前国内外稠油开采技术中重要的发展方

向之一。受石油炼制过程的启发,对稠油进行裂解改质是降低稠油黏度、提高稠油品质及流动性的最有效、最彻底的方法。如果能通过某种途径在稠油开采过程中实现原油地面、井筒甚至层内的有效裂解降黏,将对稠油、超稠油油藏的高效开发具有重大意义。稠油层内化学催化水热裂解技术就是基于这种思想发展起来的一种稠油开采新技术,该技术通过伴随蒸汽向油藏中注入合适的低温化学催化剂及其他助剂,使稠油就地实现催化水热裂解,发生开环、脱硫等一系列裂解反应,降低重质组分含量,不可逆地降低稠油黏度,从而可有效解决稠油层内流动、井筒举升、地面输运甚至炼制中的一些问题。将大功率人工低频谐振波和高频超声波与化学催化有机地结合起来,发挥波动物理场激励与催化剂化学作用的协同效应,可大幅度提高稠油水热催化裂解降黏效果。这就在一定程度上使稠油轻质化,降低了稠油开采、集输和加工的难度,有望解决目前稠油开采过程所面临的一些难题,系统深入开展这一领域的研究与实践具有十分重要的学术意义和实际意义。

笔者带领的科研团队在稠油注蒸汽波动辅助化学催化裂解降黏理论与技术方面进行了十余年的研究工作,在以下几个方面取得了一些重要的进展:

(1) 在系统深入研究稠油化学水热催化裂解降黏机理与主控因素的基础上,成功研制了新型高效有机复合金属盐多活性点催化裂解剂。在稠油复杂体系中,不同稠油分子中 C—S 键不同,目前用于稠油注蒸汽层内裂解降黏的催化剂普遍存在催化活性点类型单一和单分子上活性点数量少的共性缺陷,一般催化剂只能对一种 C—S 键有催化效果,致使用于现场时催化降黏效果达不到生产实际需要,难以进行工业化推广。聚合高分子有机复合金属盐催化剂具有多个活性点,可以针对不同的 C—S 键起催化作用,起到长效大幅度降低稠油黏度的目的。

(2) 针对目前该项技术中催化剂与稠油难以在地层内充分混合接触的问题,研制了一类无机纳米强亲油分散助剂。能使稠油和催化剂在地层内更好地亲密接触,增加 C—S 键和催化剂的接触几率,更好地发挥催化剂的催化效果,同时此助剂本身也有很好的催化功能,对稠油也有很好的催化效果。

(3) 针对目前该项技术中存在的裂解稠油重新聚并,黏度易于反弹的问题,研制了亲油性阻聚剂。稠油被催化裂解后产生两个或多个小的稠油分子,一般催化剂催化后两个或多个稠油分子很快聚合,导致催化剂效果变差,该阻聚剂能够有效地提供氢离子使稠油分子真正变成小的稠油分子。

(4) 多活性点有机复合金属盐催化剂、纳米强亲油分散助剂和亲油性阻聚剂复合使用形成了新型低温低压化学裂解剂体系,通过协同作用可使稠油最终达到长效高效降黏的目的。

(5) 将大功率低频人工谐振波和高频超声波与化学催化剂有机地结合起来,发挥波动物理场激励与催化剂化学作用的协同效应,波动发生器产生的波动场能够使 C—S 键产生振动,给 C—S 键一种脉动张—缩力,降低 C—S 键的活化键能,即变相降低了

稠油水热催化裂解最小反应温度，增大了催化剂的作用半径。大幅度地提高了稠油水热裂解的降黏效果。系统深入地研究了波动辅助化学催化裂解降黏的协同作用机理、主要控制因素及其影响规律，发明了室内静态与动态评价方法与装置，建立了化学反应动力学模型，研制了矿场配套装置，制定了矿场施工操作规范，形成了配套工艺技术，矿场试验取得了显著的增产效果和经济效益。

全书共分 13 章。前言阐述了稠油注蒸汽水热催化裂解技术研究与实践的基本概况；第 1 章阐述了稠油的基本性质、开采技术现状及新发展，第 2 章阐述了研究区稠油组成及其重质组分结构特征研究，第 3 章阐述了稠油注蒸汽水热裂解降黏技术，第 4 章阐述了稠油水热催化裂解中心活性离子优化研究，第 5 章阐述了水溶性与油溶性稠油水热催化裂解剂研究，第 6 章阐述了稠油双亲多活性点水热催化裂解剂研究，第 7 章阐述了稠油水热催化裂解助剂研究，第 8 章阐述了稠油注蒸汽 CO_2 辅助化学催化复合增效技术研究，第 9 章阐述了低频振动波辅助稠油水热催化裂解技术研究，第 10 章阐述了超声波辅助稠油水热催化裂解技术研究，第 11 章阐述了稠油蒸汽吞吐辅助催化裂解数值模拟技术，第 12 章阐述了辅助波动装置的研发及动力学模型，第 13 章阐述了矿场试验与效果评价。

本书所涉及的内容主要来自笔者及其所领导的研究团队以往的研究成果。同时，部分内容参考了近年来国内外同行专家在这一领域公开出版或发表的相关研究成果，已尽可能在书中做出标注，在参考文献目录中基本上都可以找到。尤其是本书第 6 章的内容在研究过程中，得到了中国地质大学（武汉）陈艳玲教授的大力帮助和支持，一些内容参考了陈艳玲教授发表的成果。同时，中国石化科技部、胜利油田分公司、孤东采油厂、滨南采油厂、塔河油田等石油企业相关领导与专家对本书内容的研究工作给予了大力支持。

在本书成果研究和编写过程中，课题组吴飞鹏同志参加了第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 5 章和第 12 章的研究与编写工作，刘静同志参加了第 4 章、第 5 章、第 9 章和第 12 章的研究与编写工作，杨涛同志参加了第 8 章的研究与编写工作，许洪星同志参加了第 10 章的研究与编写工作，王佩佩同志参加了第 11 章的研究与编写工作。同时，笔者的学生们对本书成果研究与总结也做了大量的工作。他们是：宋向华、崔文昊、刘通、刘新秀、黄勇、于浩然、周志斌、董巧玲。

中国石油大学（华东）油气田开发工程国家重点学科 211 工程建设计划、985 创新平台建设计划和石油工业出版社优秀学术著作出版基金对本书的出版给予了大力支持和帮助。在此，特致以诚挚的谢意。

目前，稠油注蒸汽波动辅助化学催化裂解降黏理论与技术方面的研究还很不成熟，诸多方面还处于探索阶段，加之笔者水平有限和经验不足，书中难免有不少缺点和错误，欢迎各位同行和专家提出宝贵意见。

目 录

第 1 章 稠油的基本性质、开采技术现状及新发展	1
1.1 稠油及其基本性质	1
1.2 稠油降黏技术现状	11
1.3 稠油常规开采技术	33
1.4 稠油开采技术新发展	40
1.5 小结	48
第 2 章 研究区稠油组成及其重质组分结构特征研究	49
2.1 稠油族组成特征	49
2.2 稠油元素组成特征	52
2.3 稠油中重质组分的结构特征	55
2.4 小结	64
第 3 章 稠油注蒸汽水热裂解降黏技术	65
3.1 技术现状与发展趋势	65
3.2 机理分析	71
3.3 高温作用下稠油反应规律	88
3.4 高温水物理化学性质的变化	92
3.5 影响稠油水热裂解降黏的因素	92
3.6 小结	111
第 4 章 稠油水热催化裂解中心活性离子优化研究	112
4.1 稠油分子键断裂的基本特征	112
4.2 催化剂中心离子活性作用对比分析	114
4.3 稠油水热催化裂解分子动力学模型研究	118
4.4 过渡金属离子对稠油催化裂解作用规律分析	147
4.5 过渡金属盐离子对稠油黏度的影响	149
4.6 小结	156
第 5 章 稠油水溶性与油溶性水热催化裂解剂研究	157
5.1 稠油水溶性水热催化裂解剂研究	157
5.2 稠油油溶性水热催化裂解剂研究	178
5.3 小结	198

第 6 章 稠油双亲多活性点水热催化裂解剂研究	199
6.1 新型水热催化裂解剂基本配方研究	199
6.2 新型催化剂催化裂解效果的影响因素及参数优化	200
6.3 新型催化剂体系性能评价	204
6.4 反应前后稠油的结构和特征分析	207
6.5 小结	237
第 7 章 稠油水热催化裂解助剂研究	239
7.1 概述	239
7.2 供氢剂作用下催化改质降黏依据	239
7.3 分散剂作用下催化改质降黏依据	250
7.4 供氢剂在稠油改质降黏中作用机理	260
7.5 分散剂在稠油改质降黏中作用机理	263
7.6 小结	265
第 8 章 稠油注蒸汽 CO₂ 辅助化学催化复合增效技术研究	266
8.1 稠油注蒸汽 CO ₂ 降黏技术研究现状	266
8.2 稠油注蒸汽 CO ₂ 化学催化静态实验研究	269
8.3 稠油注蒸汽 CO ₂ 化学催化动态实验研究	288
8.4 稠油注蒸汽 CO ₂ 化学催化协同作用机理	300
8.5 小结	307
第 9 章 低频振动波辅助稠油水热催化裂解技术研究	310
9.1 低频波对地层的作用机理	310
9.2 低频波对催化剂协同作用效果评价实验	310
9.3 低频人工振动波参数优化	316
9.4 低频脉冲波辅助催化裂解效果评价	321
9.5 稠油蒸汽吞吐实验	330
9.6 蒸汽驱热波耦合辅助催化裂解实验	332
9.7 小结	334
第 10 章 超声波辅助稠油水热催化裂解技术研究	336
10.1 超声波作用的国内外研究现状	336
10.2 稠油超声裂解改质影响因素与规律	337
10.3 超声波协同催化剂低温裂解超稠油影响因素与规律研究	350
10.4 超稠油超声裂解改质降黏机理研究	369
10.5 超声波协同催化剂低温裂解超稠油机理研究	385
10.6 小结	415

第 11 章 稠油蒸汽吞吐辅助催化裂解数值模拟技术 416

11.1 国内外研究及发展现状 416

11.2 稠油蒸汽吞吐辅助催化裂解数值模型建立与求解 420

11.3 稠油蒸汽吞吐辅助催化裂解数值模型计算与验证 436

11.4 数值模型的敏感性分析 450

11.5 小结 467

第 12 章 辅助波动装置的研发及动力学模型 469

12.1 水力振动器结构和工作原理 469

12.2 单个振动器数学模型的建立 470

12.3 设计低频水力脉冲震源样机的参数 485

12.4 低频水力脉冲柱塞密封套设计 488

12.5 脉冲发生器现场测试 489

第 13 章 矿场试验与效果评价 491

13.1 实验方案设计 491

13.2 施工方案设计 491

13.3 水热催化裂解体系的产品中试及效果分析 492

13.4 矿场应用试验 495

13.5 小结 509

参考文献 510

第1章 稠油的基本性质、开采技术现状及新发展

1.1 稠油及其基本性质

稠油通常是指黏度高、相对密度大、胶质和沥青质含量高的原油。国外称稠油为重质原油，对黏度极高的稠油称为沥青或沥青砂油。稠油在油层中黏度高，流动阻力大，甚至不能流动，采用常规技术难以经济有效地开发。最近十几年，国内外采用注蒸汽为主的热力采油新技术，使稠油产量不断增加，稠油在石油储量及产量中所占比例也在逐渐增加。

国内外学者对稠油的基本物理化学性质进行了大量的研究工作，为稠油的高效开发、储运和加工奠定了扎实的基础^[1, 5, 14, 99, 101, 104, 105, 106, 108, 113, 115, 118, 127, 130, 137, 139, 148, 172178, 179, 183, 209, 262]。

以下便是这些成果的简要归纳与总结^[178, 179, 183, 209, 262]。

1.1.1 稠油分类

为了便于对稠油资源评价和表征，利用适当的采油技术进行开采，各国制定了不同的标准。如联合国研究开发署提出了按黏度或黏度—密度分类的方法，见表1.1。我国根据国内的具体油藏情况制定了相应的标准，见表1.2。

表 1.1 联合国研究开发署重质油分类标准

分类	第一指标		第二指标
	地下脱气原油黏度 (mPa·s)	密度 (15.55℃) (kg/m ³)	API 重度 (°API) (15.55℃)
重质原油	10 ~ 10000	934 ~ 1000	10 ~ 20
沥青	> 10000	> 1000	< 10

表 1.2 我国稠油分类标准

分类	黏度 (50℃) (mPa·s)	密度 (20℃) (kg·m ³)
普通稠油	100 ~ 10000	920
特稠油	10000 ~ 50000	950
超稠油	> 50000	> 980

1.1.2 稠油储量

世界稠油储量约 $100 \times 10^8 \text{t}$ 。我国以陆相生油为主，资源品位较低，难开采资源的比重较大，其中稠油资源约占 21%，而待探明石油资源的绝大部分分布在海域、沙漠、沼泽和山区等开采条件极为恶劣的地区。要开发这些资源，技术要求高，资金投入大，经济效益相对较低。

我国原油资源相对匮乏，因而如何加快稠油资源的开采以弥补原油短缺的矛盾，对于石油工业的稳产和高产，不仅具有重要的现实意义，而且具有深远的战略意义。稠油黏度大，难以开采，已有的一些开采技术由于能耗高，消耗大量的资源，逐渐被新技术所取代。解决稠油开采难的问题，首先必须降低稠油的黏度，为了有效地降低稠油的黏度，必须研究影响稠油黏度的因素。

1.1.3 国内稠油油藏基本特性

我国已发现的稠油油田（油藏）有 30 多个，主要分布在辽河油区曙光一区，欢喜岭稠油区及高升油田，新疆克拉玛依九区、六东区、红山嘴油田及风城稠油区，胜利油田单家寺、乐安、胜坨三区、孤岛、陈家庄、金家等油田；河南井楼、古城等油田，大港枣园、羊三木、王官屯等油田。在华北油区冀中及二连盆地也发现了稠油。

相对于稀油油藏而言，稠油油藏具有以下特点。

(1) 油藏埋藏较浅。

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，有的则可离地表几十米至近百米。

(2) 储层胶结疏松，物性较好。

稠油藏储层多为粗碎屑岩，我国稠油藏有的多为砂砾岩，多数为砾岩，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，生产中易出砂。稠油藏储层物性较好，孔隙度高，渗透率高。孔隙度一般为 25% ~ 30%，空气渗透率一般高于 0.5 ~ 2.0D。

(3) 稠油组分中胶质与沥青质含量高，轻质馏分含量低。

稠油与轻质油在组分上的差别在于稠油中胶质与沥青质含量高，油质含量小。稠油中胶质与沥青质含量一般大于 30% ~ 50%，烷烃和芳烃含量则小于 50% ~ 60%。原油组分中 C 含量为 80% ~ 90%，H 含量为 10% ~ 14%，C/H 比约为 5.9 ~ 8.5。其他元素（O，S，N）约占 1.0%，有的可达 2.0% ~ 3.0%。稠油与轻质原油在其化学组成中重大差别之一在于稠油含氢量低，C/H 比大。H 含量一般小于 12%，C/H 比一般大于 7.0。原油中除了主要的碳氢化合物外，特别是稠油中还含有大量的 O，H 和 S 的

化合物以及石油的灰分。灰分中发现的元素超过 40 种，可分为 3 组变价金属 (V, Ni, Fe, Mo, Co, W, Cr, Cu, Mn, Pb, Ca, Ag, Ti)；碱和碱土金属 (Na, K, Ba, Sr, Mg)；卤素和其他元素 (Cl, Br, I, Si, Al, En) 等。

稠油的黏度对温度极为敏感，随着温度的升高，原油黏度急剧下降，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 1 倍。稠油中也可以溶解有天然气，这可使黏度大大降低。

(4) 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。含蜡高，凝固点也高。稠油含蜡量一般小于 10%，其凝固点一般低于 20℃。我国部分稠油田含蜡量小于 5.0%，凝固点大多在 0℃ 以下。

(5) 原油含气量少，饱和压力低。

稠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，使其原油中轻质馏分含量低，含气量低，200℃ 馏分一般小于 10%，原始气油比小于 10m³/t，有的则小于 5m³/t，油藏饱和压力低，天然能量小。

1.1.4 稠油中的胶质与沥青质

稠油胶质和沥青质含量高是其高黏度的根本原因，研究胶质和沥青质的化学结构与组成特征具有十分重要的意义。

1.1.4.1 胶质

胶质，也称非烃，多为棕黄色到黑色的黏稠状液体和半固体，它是杂环和羧酸的复杂混合物，主要是指分子结构中除含有 C 和 H 原子外，还含有 S, O 和 N 等杂原子的多环或稠环化合物，平均相对分子质量在 500 ~ 1000 左右，结构见图 1.1。其中 S 占 0.5% ~ 5% 质量分数，O 占 2% ~ 8% 质量分数，N 占 2% 质量分数左右。从胶质组分中已鉴定出若干种同系化合物。胶质的化学组成及含量对原油物理化学性质有较

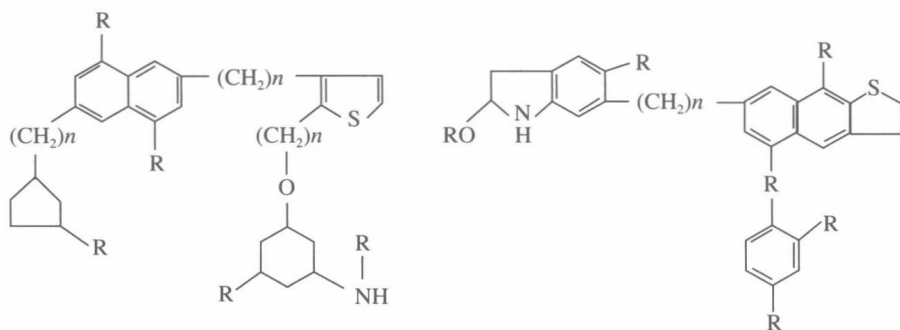


图 1.1 胶质化学结构示意图

大影响。胶质含量的高低直接与稠油的本体黏度相关，稠油的高黏度原因之一在于其中的高相对分子质量胶质组分。由于胶质化学结构的复杂性和组成的不均匀性，目前国内外对这方面的研究还不够深入，仅对胶质组分的元素含量相对分子质量及结构和官能团进行了初步分析。

根据国内外目前关于胶质和沥青质中所含化合物的研究结果，将胶质的主要化合物类别总结如表 1.3 所示。胶质中主要化合物是含有 S，O 和 N 原子的杂环和羧酸类化合物。

表 1.3 胶质化合物的主要类别

类别	举例		
甲基茚酮类	烷基茚酮		
	烷基苯并茚酮		
	烷化苯并萘并茚酮类		
	其他茚酮的甲基取代物		
醇类	烷化二羟基菲类		
	烷基茚醇类		
	烷基苯并茚醇类醇类		
	烷基二苯并茚醇类		
羧酸类	正链烷酸		
	支链烷酸		
	烷化的二苯并噻吩羧酸		
	三环萘酸同系物		
	不饱和三环萘酸		
	烷化的蒽羧酸		
	五环藿烷酸		
有机硫化物	脂族硫化物		
	环状硫化物	噻吩类	噻吩类
			苯并噻吩类
			二苯并噻吩类噻吩类
			苯并萘噻吩类
		双环萘类和相应的亚砷	
		三环萘类和相应的亚砷	
		四环萘类和相应的亚砷	

续表

类别	举例	
有机硫化物	环状硫化物	五环萘类
		六环萘类和相应的亚砷
		藿类硫化物
	其他硫化物	硫醇
		硫醚
		二硫化合物
		硫化物
有机氮化物类	卟啉类	烷基卟啉系列
		卟啉类烷基苯并卟啉类
		烷基四氢二苯并卟啉类
	喹啉类	烷基喹啉类
		烷基苯并喹啉类
		烷基四氢二苯并喹啉类
		烷基 azafluoroanthrene 类
		二苯并喹啉类
		烷基八氢苯并喹啉类
	烷基氮杂茈	

可见,胶质的含氧化合物主要是一系列茱酮和羧酸。茱酮类主要是烷基茱酮、烷基苯并茱酮和它们的甲基取代物。环状硫化物是稠油胶质中另一族重要分子,其中含有双环、三环、四环、五环和六环萘类结构及相应的亚砷。三环萘类硫化物系列的化合物与其他环状类异戊二烯硫化物相比,脱硫非常困难。藿类硫化物是另一类萘类硫化物,经加氢脱硫后可转化为藿烷。所有环状硫化物都很容易被空气氧化为相应的亚砷。稠油中的含氮化合物主要是卟啉和喹啉及其烷基、烷基苯衍生物,此外还有烷基氮杂化合物。喹啉系列多数分子是多甲基取代的,少数有乙基取代基。喹啉化合物为碱性的,而卟啉类是非碱性的。

1.1.4.2 沥青质

沥青质一般是指被过量正构烷烃沉淀的原油组分,正构烷烃溶剂可以是正戊烷、正己烷或正庚烷。在 40 ~ 50 倍正戊烷中慢慢加入稠油的苯或二氯甲烷溶液中时,沥青质就沉淀出来。沥青质一般溶于苯中。沥青质表面上看是有光泽的黑色无定形固体。