

石油科学进展 17A

# 提高石油采收率

第一分册 基础理论及分析

〔美〕 E.C.唐纳森 G.V.奇尼加赖恩 T.F.晏 等著

石油工业出版社

TE 357/00  
TE 357  
010-1

070864

石油科学进展17A

# 提高石油采收率

## 第一分册 基础理论及分析

〔美〕 E.C.唐纳森 G.V.奇尼加赖恩 T.F.晏 等著

童育英 黄亚铎 译

秦同洛 校

石油工业出版社

## 内 容 提 要

“提高石油采收率”一书分两册。第一分册是“基础理论及分析”，第二分册是“工艺方法和操作”。

本书对提高石油采收率(EOR)这一新技术的基础理论和有关的物理化学问题进行了系统的阐述，同时对有关的实验分析作了深入讨论，并介绍了目前石油工业采用的热力采油法、二氧化碳-混相驱油法和化学驱油法的技术改进及其推广使用的进展，对其中所涉及的一些新方法、新理论进行了详细的论述，对提高石油采收率的研究具有重要意义。

本书可作为从事采油科学研究和生产人员的参考书，也可作为高等院校师生的参考书。

Developments in petroleum science, 17A

Enhanced oil recovery, I

fundamentals and analyses

E. C. Donaldson, G. V. Chilingarian, T. F. Yen

Elsevier Science Publishers B. V.

1985

石油科学进展 17A

提高石油采收率

第一分册 基础理论及分析

〔美〕E. C. 唐纳森 G. V. 奇尼加赖恩 T. F. 晏 等著

童育英 黄亚铎 译

秦同洛 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京丰盛印刷厂排版

北京通县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米16开本15印张 1插页355千字 印1—2,200

1989年10月北京第1版 1989年10月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0300-6/TE·299

定价：3.35元

## 译 者 的 话

本书由美国Tulsa大学教授C.Barker等十六位著名学者、专家共同所著，并由俄克拉何马大学的E.C.Donaldson教授、南加利福尼亚大学的G.V.Chilingarian教授和T.F.Yen教授编辑成书。

该书出版于1985年，内容十分丰富，包括石油成因、注水采油、提高采收率技术等多方面的理论和实践。

全书共分八章，第一、二、五章由童育英译；第三、四、六、七章由黄亚铎译；第八章由邓澍宏译。全书由秦同洛先生总校。译者衷心感谢范从武先生、谢兴礼先生分别对第二章、第五章所做的校对工作。同时对石油工业出版社在审编过程中给予的指导和帮助，以及其它有关同志的大力协助在此一并致以深切的谢意！

由于译者水平所限，时间较仓促，虽然尽力，错误难免，不妥之处请批评指正。

1987年6月

## 前 言

估计世界可开采液态石油的储量介于 $10^{14}$ 与 $2.117 \times 10^{15}$  Quad之间 (1 Quad等于 $10^{15}$ 英制热量单位; 1 Quint等于 $10^5$  Quad)。到1983年为止世界原油的产量大约是2800 Quad, 仅在1982年世界产量约为110 Quad, 这个数量相当于190亿桶, 后面数字可解释为每日消耗6500万桶石油。

依据现在的石油消耗量, 世界可开采石油将在十五年内耗尽。然而用常规的方法, 只能采出原始地质储量的三分之一。因此, 任何提高采收率的尝试和努力均可促进部分地回收在世界范围内剩余的约50 Quint (1 Quint等于 $10^{10}$ 英制热量单位, 译者注) 的石油。

各种提高石油采收率的技术 (EOR) 都把开采油藏中的这类剩余地质储量作为目标。与人工合成燃料、发现新油田、开发重油和沥青等相比, 这种技术是可望在近期内增加液态石油供应的一种选择。

现在热力采油法、二氧化碳混相驱油法和化学驱油法都已为石油工业所应用。根据目前工业的发展趋势, 美国在下一个十年期间, 计划用热力采油法、二氧化碳混相驱油法以及化学驱油法的产量将分别为每天2万~7万桶、30万~56万桶和15万~25万桶。这些活动主要集中在美国的四个州: 得克萨斯、加利福尼亚、路易斯安那和俄克拉何马。

提高石油采收率是新的、发展中的技术, 它们能否在大规模的实践中取得广泛的成功, 一般还有待证实。在确定油藏中油量方面的不确定性, 拟定在应用提高石油采收率方法中的关键性参数, 以及其他一些不确定因素, 如油的质量等等, 是使这些技术应用受限制的主要原因。因此, 更好的测量残余油饱和度的方法是必需的。提高石油采收率方法对环境的影响还没有进行全面的研究, 还需要作定量的研究和评价。为了使这些方法便于广泛地应用, 还有其他一些需要研究的问题, 包括新方法的发展, 开采中采油效率的改善, 以及混相法和化学法技术的推进。

我们相信, 为了解决这些问题, 需要世界范围内的合作来进行更多的基础研究。根据这一观点, 编者编著了这部分为两册的书, 它回顾和概括了这些技术迄今为止的进展。第一册专门研究基础理论和分析, 而第二册将是讨论工艺过程和作业的专著。我们希望本书能鼓励科学家和工程师们在这个难度很高的领域中做出进一步的贡献。我们还希望在将来, 提高石油采收率技术对作为能源之一的石油的生产做出显著的贡献。

E.C. 唐纳森

G.V. 奇尼加赖恩

T.F. 晏

# 目 录

|                   |      |
|-------------------|------|
| 第一章 绪 论           | (1)  |
| 第二章 石油的成因、组成和性质   | (7)  |
| § 2-1 引言          | (7)  |
| § 2-2 石油的生成       | (7)  |
| 一、生物成因            | (7)  |
| 二、热生成作用           | (8)  |
| 三、生物成因的甲烷气        | (12) |
| § 2-3 运移作用        | (12) |
| § 2-4 储集层中原油组成的变化 | (15) |
| 一、热成熟作用           | (15) |
| 二、水洗作用            | (16) |
| 三、细菌降解作用          | (17) |
| § 2-5 原油的组成       | (18) |
| 一、引言              | (18) |
| 二、取样、贮存和分析        | (19) |
| § 2-6 原油中的化合物     | (19) |
| 一、引言              | (19) |
| 二、烃 类             | (21) |
| 三、含杂原子的化合物        | (24) |
| 四、金 属             | (26) |
| 五、沥青的组分           | (26) |
| § 2-7 物理特性        | (27) |
| § 2-8 分类          | (28) |
| 参考文献              | (30) |
| 第三章 提高采收率 原理      | (34) |
| § 3-1 引言          | (34) |
| § 3-2 孔隙几何结构      | (34) |
| § 3-3 驱替的微观状况     | (36) |
| § 3-4 非混相驱和前缘区    | (36) |
| § 3-5 残余油         | (37) |
| § 3-6 残余油的数量      | (38) |
| § 3-7 残余油的推动作用    | (39) |
| § 3-8 捕集的防止       | (40) |
| § 3-9 浮力与防止捕集     | (41) |
| § 3-10 润湿性        | (41) |
| § 3-11 润湿性和残余油    | (42) |
| § 3-12 润湿性和原油采收率  | (43) |

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| § 3-13 混相驱.....               | (44) |
| § 3-14 条件混相驱.....             | (45) |
| § 3-15 宏观驱替状况.....            | (47) |
| § 3-16 总结和结论.....             | (48) |
| 参考文献.....                     | (49) |
| <b>第四章 相对渗透率</b> .....        | (53) |
| § 4-1 引言.....                 | (53) |
| § 4-2 预测两相和三相相对渗透率的数学模型.....  | (53) |
| § 4-3 相对渗透率测量的实验方法.....       | (62) |
| 一、稳态法.....                    | (62) |
| 二、非稳态(驱替)法.....               | (65) |
| § 4-4 试验岩心的处理.....            | (68) |
| § 4-5 影响相对渗透率的因素.....         | (69) |
| 一、流体饱和度和饱和度历史.....            | (69) |
| 二、粘滞力、毛细管力和重力.....            | (71) |
| 三、润湿性.....                    | (74) |
| 四、温度.....                     | (75) |
| § 4-6 结束语.....                | (75) |
| 参考文献.....                     | (76) |
| <b>第五章 流动试井分析: 液体情况</b> ..... | (83) |
| § 5-1 物理系统及其数学描述.....         | (83) |
| 一、质量守恒方程.....                 | (83) |
| 二、运动方程.....                   | (84) |
| 三、状态方程.....                   | (84) |
| § 5-2 流动方程对物理系统的应用.....       | (85) |
| § 5-3 流动状态.....               | (85) |
| § 5-4 基本解和叠加原理.....           | (87) |
| 一、基本解.....                    | (87) |
| 二、叠加原理.....                   | (88) |
| § 5-5 等产量压力降落和压力恢复.....       | (88) |
| 一、压力降落.....                   | (88) |
| 二、压力恢复.....                   | (89) |
| § 5-6 表皮效应.....               | (89) |
| § 5-7 两产量流动试井.....            | (91) |
| § 5-8 多产量压降试井.....            | (92) |
| § 5-9 变产量压力恢复试井.....          | (94) |
| 一、近似算法.....                   | (94) |
| 二、 $t \cdot q$ 方法.....        | (94) |
| 三、精确方法——叠加法.....              | (95) |
| § 5-10 平均油藏压力.....            | (95) |
| § 5-11 非均质性和流动试井的解释.....      | (97) |
| § 5-12 井筒储存效应.....            | (98) |
| § 5-13 多相流.....               | (99) |

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| § 5-14 干扰和脉冲试井        | (100) |
| § 5-15 注入井            | (100) |
| § 5-16 曲线拟合法          | (101) |
| 参考文献                  | (102) |
| <b>第六章 提高采收率中的注入水</b> | (104) |
| § 6-1 引言              | (104) |
| § 6-2 油田水的产状、起源和演变    | (106) |
| § 6-3 油田水的化学和物理性质     | (113) |
| 一、无机物组分               | (113) |
| 二、阳离子                 | (114) |
| 三、阴离子                 | (115) |
| 四、物理性质                | (117) |
| 五、溶解气                 | (118) |
| 六、稳定同位素               | (119) |
| 七、有机组分                | (119) |
| § 6-4 取样              | (120) |
| 一、钻杆测试                | (121) |
| 二、溶解烃                 | (123) |
| 三、在出油管上取样             | (123) |
| 四、在井口取样               | (123) |
| 五、用于确定不稳定性质或物质的样品     | (125) |
| 六、用于稳定同位素分析的样品        | (125) |
| 七、样品容器                | (125) |
| 八、描述样品的表格             | (125) |
| § 6-5 油田水分析方法         | (126) |
| § 6-6 提高采收率的作业        | (127) |
| 一、表面活性剂和聚合物驱          | (127) |
| 二、聚合物驱作业              | (131) |
| 三、碱水驱作业               | (131) |
| 四、二氧化碳驱               | (131) |
| 五、烃混相驱                | (131) |
| 六、惰性气体驱               | (132) |
| 七、层内燃烧                | (132) |
| 八、蒸汽驱                 | (132) |
| § 6-7 注入水             | (132) |
| 一、水源                  | (132) |
| 二、淡水                  | (134) |
| 三、海水                  | (134) |
| 四、用海水与地层水作为水资源的比较     | (134) |
| § 6-8 水质试验            | (134) |
| 一、膜过滤试验               | (135) |
| 二、水的相容性               | (136) |

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 三、硬石膏和石膏                           | (139) |
| 四、水的相容性试验                          | (139) |
| 五、粘土的敏感性                           | (139) |
| 六、岩心流动试验                           | (142) |
| 七、腐蚀                               | (142) |
| 八、细菌                               | (143) |
| 九、硫酸盐还原细菌计数                        | (144) |
| 十、总的细菌计数                           | (144) |
| § 6-9 注入能力损失                       | (146) |
| § 6-10 结论                          | (146) |
| 参考文献                               | (147) |
| <b>第七章 提高采收率工艺中的一些化学和物理问题</b>      | (161) |
| § 7-1 引言                           | (161) |
| § 7-2 沥青质和石蜡的沉淀与沉积                 | (161) |
| 一、沥青质和石蜡化学                         | (162) |
| 二、决定沥青和石蜡沉积的因素                     | (164) |
| 三、消除沉积物                            | (166) |
| § 7-3 结垢问题                         | (166) |
| 一、油田盐水 ( $\text{CaCO}_3$ 水垢) 稳定性标准 | (167) |
| 二、硫酸钙水垢                            | (168) |
| 三、其它水垢                             | (161) |
| 四、水垢的控制                            | (161) |
| 五、清除水垢                             | (161) |
| § 7-4 碎屑迁移对地层的破坏                   | (161) |
| 一、粘土迁移和膨胀的物理化学                     | (161) |
| 二、在提高采收率过程中的微粒迁移                   | (165) |
| 参考文献                               | (166) |
| <b>第八章 注水</b>                      | (169) |
| § 8-1 引言                           | (169) |
| § 8-2 注水开采的“经验法则”                  | (174) |
| § 8-3 用类比法进行注水设计                   | (174) |
| § 8-4 扫油效率                         | (175) |
| 一、井网选择                             | (176) |
| 二、不在井网上的井的影响                       | (179) |
| 三、不封闭井网                            | (182) |
| 四、裂缝                               | (183) |
| 五、油藏非均质性                           | (184) |
| 六、突破后的继续注入                         | (185) |
| 七、流度比                              | (186) |
| § 8-5 主要预测技术                       | (187) |
| 一、Buckley-Leverett 预测技术            | (187) |
| 二、Dykstra-Parsons 预测方法             | (193) |

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| 三、Stiles 方法 .....                     | (196)        |
| § 8-6 碳酸盐油藏水驱预测及动态 .....              | (197)        |
| 一、引言 .....                            | (197)        |
| 二、晶间-粒间孔隙系统 .....                     | (198)        |
| 三、水驱油田的动态 .....                       | (205)        |
| § 8-7 裂缝-基岩孔隙度系统 .....                | (206)        |
| 一、吸渗注入 .....                          | (209)        |
| § 8-8 空穴-溶洞孔隙度系统 .....                | (212)        |
| § 8-9 改进的注水开发方法 .....                 | (214)        |
| 一、聚合物 .....                           | (214)        |
| 二、表面活性剂 .....                         | (215)        |
| § 8-10 几个实施中的重要水驱方案的动态 .....          | (219)        |
| 一、Jay/Little Escambia Creek 油田 .....  | (219)        |
| 二、Bell Creek 油田 .....                 | (220)        |
| 三、West Delta 73区油田 .....              | (220)        |
| 四、Wichita County Regular 油田 .....     | (221)        |
| 五、伊利诺伊州Marion县Salem单元 .....           | (221)        |
| 参考文献 .....                            | (222)        |
| <b>附录 本书所用许用计量单位与非许用计量单位换算表 .....</b> | <b>(227)</b> |

# 第一章 绪 论

E.C.DONALDSON, T.F.YEN和G.V.CHILINGARIAN

通常认为提高石油采收率(EOR)是有效原油生产的第三阶段,也是最后一个阶段,有时称之为三次采油。原油生产的第一个阶段,或叫一次采油,原油的产出是从油田的发现开始的,是利用挥发组分膨胀后把油推向井底的自然储能,借助在单个井中使用抽油泵作为辅助能源。当这种能量衰竭时,油产量下降,此时通过注水向油层提供补充能量,即开始了开采的第二阶段(二次采油)。当该油田的水油比接近作业的经济极限时,即产出油的价值与水处理及其注入费用相差太小,而使纯收益减少时,则又进入了第三次采油的阶段。当在油田开采历史的最后阶段,把化学的或热能的方法引入以提高石油的产出量,这个阶段被称为“提高原油采收率”(或称“强化开采”“Enhanced Oil Recovery”,即EOR)。事实上,只要利用某种化学或热能方法来增产原油成为必要时,就可以在油藏开采时期的任何进程中引入EOR方法。

由一次采油和二次采油方法采出的原油总量一般小于原始地质储量的40%。因而,EOR的潜在目标将大于用传统方法所能开采的产量。

开始选用EOR方法以前,作业者必须从现状出发,并应获得尽可能多的有关油藏及其原油饱和度资料。这个工作的完成可以应用过去的分析数据和油田生产历史资料,以及在经济投资的极限范围内进行新的地球物理探测、示踪剂分析和岩心研究;从而尽可能精确地确定油藏性质。这一资料群为预测实施各种已被证实为有效的EOR技术的可采储量奠定了合理的基础。EOR方法中包括了注入溶于注入水的化合物、交替注入混相气体和水、注入胶束溶液(由各种表面活性剂、醇类和原油组成的微乳液体系)、注蒸汽以及火烧油层等。

对于EOR来说,最关键的信息资料大概要算是油藏中目前原油饱和度了。投资者必须权衡估算出的EOR可采油量与实施这类更新的或发展中的技术所需的总费用两者之间的关系。EOR方法的选择还取决于地质储量,以及油藏深度、原油粘度等等。因而,为了精确地确定油藏的原油饱和度,最近发展了许多新的测井方法以及其他方法,例如,单井示踪剂法等。

图1-1是用碱水-聚合物技术这一特定的情况为例,来说明应用化学驱EOR方法的一般过程。通常,把化学剂引入油藏以前由“前置液”为前导(注入低含盐度水或受控 $n$ 级次浓度的盐水)在高盐度的油层水与化学剂溶液之间放置一个相容的水基缓冲段塞,以避免溶解的盐对化学剂的不利作用。化学添加剂是洗涤剂型的化合物(常用的是石油烷基磺酸盐)、有机聚合物(增加非均质油藏的扫油效率),以及胶束溶液。在油藏经前置液调整后,注入碱水或其他化学剂溶液,如图1-1所示。化学剂溶液注入后,接着注入聚合物溶液(通常是聚丙烯酰胺或聚糖类),以增加流体粘度,以帮助化学剂流经油藏,并尽量减少由于稀释和窜流引起的损失。最后,聚合物后面注入水的矿化度将逐渐增加到油田流体的正常浓度。

另一种EOR技术是利用注入气体,来保持压力,并利用混相或溶液来驱替原油,如图



图 1-1 化学驱 (碱水) 示意图

图中所示方法需注入前置液以调整油藏，接着注入碱水或碱水-聚合物溶液，它在油藏就地形成表面活性剂以脱吸原油，然后注入聚合物溶液以控制流度比，注入驱动流体（水）来推动化学剂和形成的油墙，将其推向生产井。

①—驱动流体（水）；②—保护聚合物的淡水缓冲剂；③—控制流度比的聚合物溶液；

④—碱水溶液在油藏就地形成表面活性剂以脱吸原油；⑤—增产的原油（油墙）；⑥—调整油藏的前置液

1-2所示的注入二氧化碳法，它已成为一种可靠的EOR方法。混相气体对推动油流所起的作用的机理是：（1）由于气体溶于油中而降低了原油粘度；（2）油相体积增大；因为在高压下，二氧化碳可以大量地溶解在原油中，使原油产生了明显的膨胀。已经发展了的二氧化碳的三种注入模式：（1）先注入气体段塞，随后再注水，如图1-2所示；（2）注入饱和二氧化碳的水；（3）气体自身的高压注入。

已经出现了几种利用EOR热力方法的技术。选择这种还是那种技术主要取决于对油藏条件和经济效益的总评价。迄今为止，EOR热力方法已被证实可用于稠油开采，即 $API^\circ < 20$ 的原油。“蒸汽驱”如图1-3所示，在原理上是一种简单过程。蒸汽在地面产生，注入中心井由于下述原理的综合作用：（1）油从砂粒上受热而释放；（2）石油粘度的降低；（3）压力驱油到生产井；最后把石油驱向周围生产井。驱油机理是几个互相作用的物理变化的综合，例如，原油粘度降低和蒸汽的蒸馏作用，这可以想象为几个彼此独立的推进前缘如图1-3所示。然而该项技术需要付出相当大的努力来处理锅炉水和烧油产生的烟气，其中常含有硫和氮的化合物。

第二种热力EOR技术如图1-4所示。这是一种单井吞吐过程的方案（也称之为蒸汽浸泡法）。先注入蒸汽，后关井，在开井抽油以前使蒸汽有时间将热传给注入井附近的油藏，随后开始抽油，一直持续到油的产量衰减至低于某一可接受的水平时，然后再开始下一周期的工作。

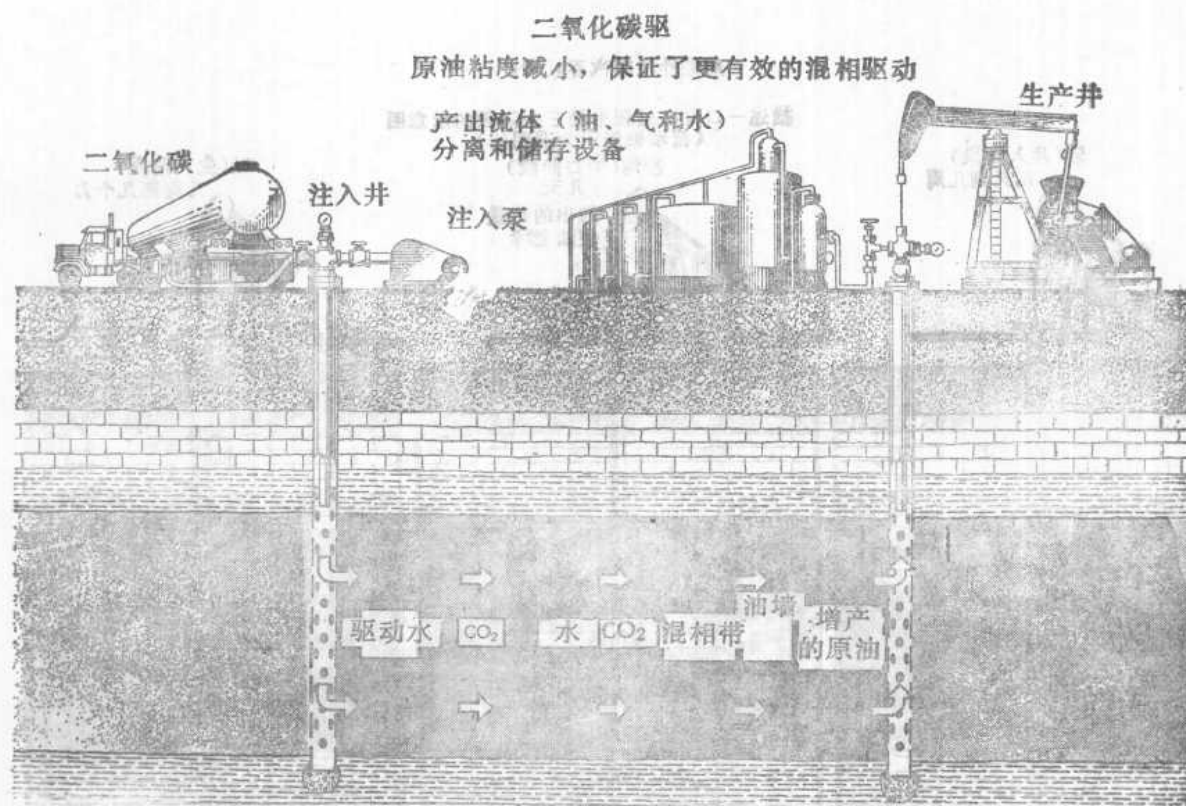


图 1-2 二氧化碳驱示意图

图中所示是适用于很多油藏的混相驱替方法，先注入二氧化碳（CO<sub>2</sub>），再交替注水和注二氧化碳（WAG'）通常是最可行的方法



图 1-3 蒸汽驱的示意图

由注入稠油油藏的蒸汽携带的热量使油变稀，使蒸汽更容易将油经过油层推至生产井

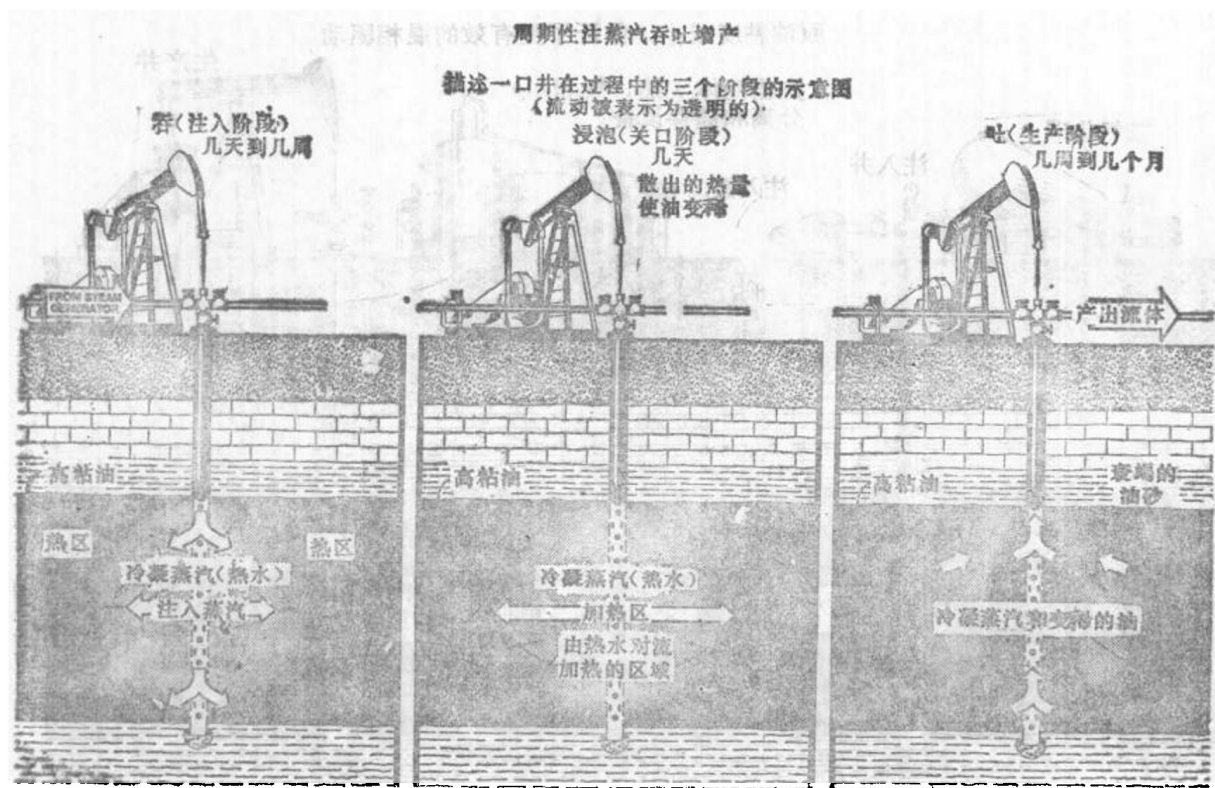


图 1-4 周期性注蒸汽吞吐增产示意图

图中表示蒸汽注入稠油油藏中一口井，蒸汽将热带入油藏，结合交替的“浸泡期”，使油变稀，从同一口井中产出。这个过程可重复进行直到产量降至可获利的水平以下（注：关口阶段为“浸泡期”）。

第三种热力EOR方法要求在油藏中就地点火，并通过注入空气或氧气来保持一个燃烧前缘，如图1-5所示火烧油层的油藏中发展为几个不同的带。这一过程的机理很复杂，但是燃烧前缘（及原油生产）以一种很有规律的方式前进促使了在它前面的燃烧气、蒸汽热水和流动油的混合物向前推进。采油过程一直进行到以注入井为中心的燃烧前缘半径扩展到使连续注入空气或氧气无论在技术上或是经济上都不再可行的程度为止。

因此，“EOR”就意味着某一个已被证明为技术上切实可行的工艺方法应用。然而，没有一种方法是那样的广泛普遍，以致于它在任何情况下都可以应用。所以，本书力图将各种已经被证实了的EOR技术的详细分析加以汇集。本书将从对石油成因理论的考察开始。

石油生物成因的根据很大程度上依赖于对石油的分析，石油是含有不同数量的氮、硫与氧的化合物以及复杂碳、氢化合物的混合物，各组分含量与石油的来源紧密相关。生油岩层往往是含有海底化石的水生沉积岩。石油的生物成因说的另一佐证是在原油中发现了具有与生物系统的分子结构密切相关的特征分子结构的化合物（即生物标志物——译者注）。而储集于生油岩层中的原始有机物类型控制了最后所生成的石油类型。当生油岩层经历了成岩作用、深成作用（Catagenetic）和构造变化（隆起、褶皱、埋藏、风化等等），其中所生成的石油便运移进入了可渗透的圈闭，在圈闭内的初始聚集之后，原油可在地质力的作用下再次流动并重新聚集，此过程中常常有明显的组分变化。石油成分的主要变化也可能是由于与流动的气体和水的紧密接触而引起的。气体可能引起沥青质的沉降，与流动水接触的主要影响是去掉了

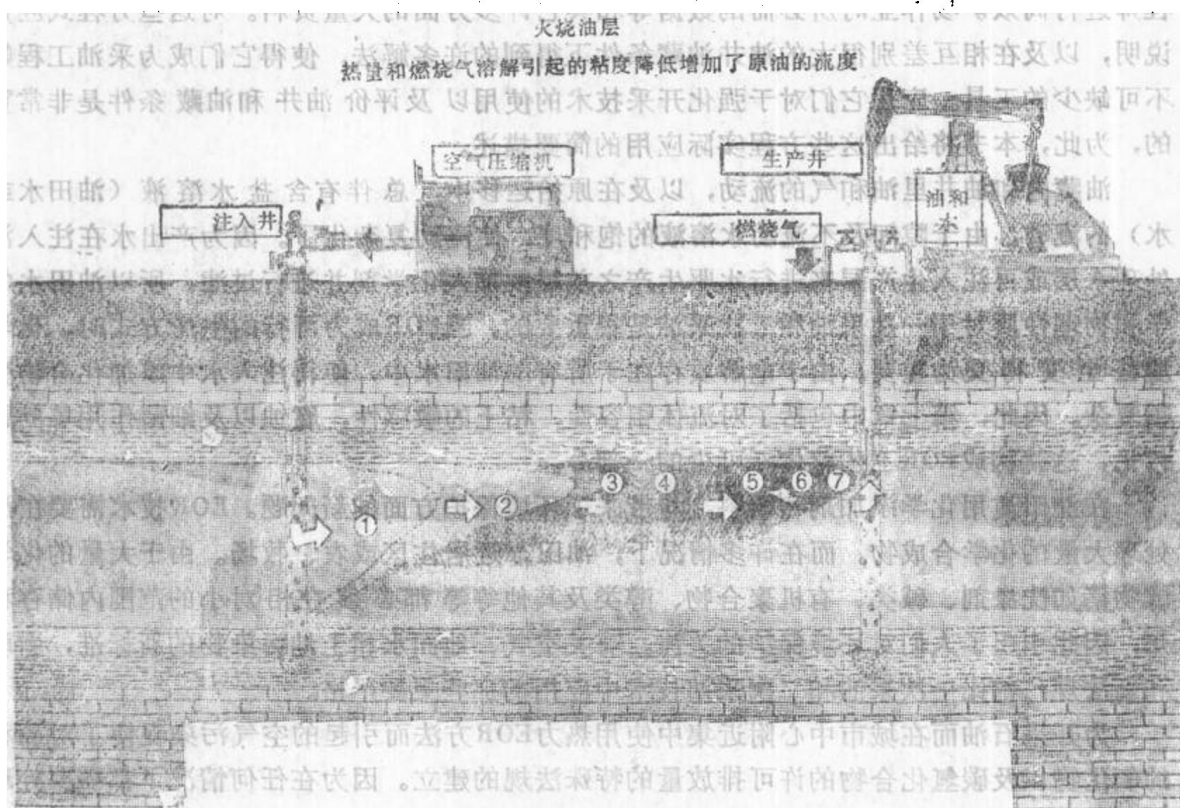


图 1-5 火烧油层示意图

该法是用热量使原油变稀，使之更容易地流向生产井。在火驱法中，油层被点燃，通过连续注入空气，火焰前缘在油藏中推进

注：①—注入空气和水区（燃烧过）；②—空气和蒸发水区；③—燃烧前缘和燃烧区（ $600^{\circ}\text{F}\sim 1200^{\circ}\text{F}$ ）；  
④—蒸汽或蒸发区（约 $400^{\circ}\text{F}$ ）；⑤—冷凝或热水区（高于原始温度 $50^{\circ}\text{F}\sim 200^{\circ}\text{F}$ ）；⑥—油墙（接近原始温度）；⑦—冷却的燃烧气

水溶性组分。如果在运移和二次聚集过程中石油暴露于地面，则将会发生挥发组分蒸发并伴以低分子量石蜡烃的细菌降解。这样，由当今油藏中石油的化学组成与初始生油层内残迹石油的组成相似而导致了石油生物成因的理论。

石油生成之后的运移和聚集受到多孔介质中流体流动的自然现象的控制。它包括三种不同的相，往往有两种或三种流体同时流动：水相、油相和气相。因此，利用两相或三相的相对渗透率的详细分析，讨论了多孔介质内流体多相流动的各个方面，许多科学家已经对在稳态和非稳态条件下的相对渗透率进行了试验。由于这类现象的复杂性，在多孔介质中多相流的基本微观描述还没有发展起来。然而，在反映流体速度与压力梯度和流体粘度之间关系的Darcy定律的基础上，建立了一些经验关系式，并在石油工程中得到了广泛的应用。与此相联系的是相对渗透率的概念，它是分析流体流动问题的基础。有关这一专题将在第四章里进行相当详细的讨论，其中包括了对有关文献的评述。

在多孔介质中两相或三相流体流动的分析中，在广义上认为流体在油藏深处为线性流动。然而，在采油工程中一个重要的考虑是存在于井眼附近油藏的静态和动态条件。从试井分析的实用工程角度出发研究了其基本数学关系及其解释的综合分析。从非稳态试井中得到了诸如井眼损害（污染）、井眼体积、油藏压力、油藏不连续性、就地渗透率以及在为油藏工

程师进行高效矿场作业时所必需的数据等和其它许多方面的大量资料。对这些方程式应用的说明,以及在相互差别很大的油井油藏条件下得到的许多解法,使得它们成为采油工程师们不可缺少的工具。应用它们对于强化开采技术的使用以及评价油井和油藏条件是非常重要的,为此,本书将给出这些方程实际应用的简要描述。

油藏内和油井里油和气的流动,以及在原始运移中,总伴有含盐水溶液(油田水或盐水)的流动。由于隙间及不流动水溶液的饱和度,使流动复杂化了。因为产出水在注入污水处理水层或再注入生产层来进行水驱生产之前需要加入化学剂并进行过滤。所以油田水的化学和物理性质对于一次采油和二次采油是很重要的。当EOR成为可行的生产方式时,化学性质甚至变得更为重要。由于电解质存在于所有的油田水中,使得注入水中添加化合物变得很复杂。因此,第七章中包括了对流体相容性,粘土的敏感性,腐蚀以及细菌作用等问题的讨论,这就构成EOR工艺整体不可少的一部分。

在油田使用化学添加剂和燃料,均带来了环境保护方面的新问题。EOR技术需要在油田处理大量的化学合成物。而在许多情况下,油田靠近居住区或农、牧场。由于大量的化学合成物诸如洗涤剂、碱类、有机聚合物、醇类及其他等等都必须在相对小的范围内储存和使用,因此引起了人们对环境保护的关注。有关空气、地面水和土地污染物的新标准,新政策和新法规,都比一次采油和二次采油技术中应用的那些更要严格。

为开采石油而在城市中心附近集中使用热力EOR方法而引起的空气污染促使了对硫和氮的氧化物以及碳氢化合物的许可排放量的特殊法规的建立。因为在任何情况下都需要处理或回收污染物,这对热力采油的经济效益带来了严重的冲击。

在往地下注入液体化学剂和气体进行采油的地方,需要加以控制以消除储存设备和泵送装置中蒸气的外逸,甚至还应考虑到注入的化学剂可能成为一种潜在的对新鲜水源的污染,因为化学剂可通过较深的油藏内的裂缝、断层、废弃井、注入井固井时没固结好的水泥等渠道而流入水层。因此,任何EOR技术都必须接受防止意外的地面水污染的检查,需配备消除化学剂外逸的设备以及承担一切可能发生的无意的或意外污染的额外负担。

管理上的障碍、环境问题、以及由此而带来的技术上经济上的风险在EOR技术的商业性应用中起着重要的作用并造成不可忽视的经济上的负担。因此有关环境保护的问题已经成为EOR作业整体中重要的一部分。

很难预测EOR未来的发展趋势,因为它还是一门正处于不断进行深入基础研究和工程试验研究阶段的方兴未艾的技术,在强化采油生产、原油集输和炼制过程中世界规模的对微生物方法应用的兴趣,可能发展成为一种全新的具有巨大潜力的应用技术。

迄今为止,EOR技术的发展是令人鼓舞的,然而目前更需要一种普遍适用,经济可行的新方法的突破性成果,它对原油生产及其效率的提高将产生巨大、有利的推动作用。正是这种潜力和令人振奋的前景激励着工业界、大学和政府为之做出不懈的研究。

表面活性剂、碱水、聚合物、二氧化碳和混相驱法的详细论述将在本书的第二册中进行。微生物强化采油和火烧油层也将在第二册中加以讨论。

## 第二章 石油的成因、组成和性质

COLIN BARKER

### §2-1 引言

石油是一种自然界中存在的复杂混合物，主要由有机的碳氢化合物组成，并且常含有相当数量的氮、硫和氧，以及少量的镍、钒等其它的元素。它可以分别以气态、液态或固态如天然气、原油或固体沥青等形式出现。原油和天然气的经济价值以及与油气开采有关的问题，激起了人们对石油的成因及影响其物理性质和化学组成的因素产生了相当大的兴趣。石油的物理性质和化学组成最初取决于生成石油的生油岩中有机物质的类型。然而，在石油向储集层运移的过程中，以及在储集层内发生的熟化和替变转化过程中，其组成可能有相当大的变化。在本章中，按下列顺序进行讨论：（1）石油在生油岩中的生成；（2）石油运移入储集层；（3）石油再运移入新储集层；（4）可能影响储集层中石油组成的，随后发生的替变转化和运移作用。

### §2-2 石油的生成

#### 一、生物成因

石油中含碳物质的生物成因观点已得到广泛的承认（但不是普遍的承认<sup>①</sup>）。因为，无机生成过程只能产生外消旋混合物，所以，石油中旋光性化合物的存在，特别是多环的环烷烃的存在（环烷族）为生物成因假说提供了有力的佐证。石油中还含有所谓的“化学化石”或“生物标志物”，它们是一些具有独特结构的，可能与生物体系中的某些化合物有关的化合物。这些化合物包括异戊间二烯类、卟啉、甾烷和藿烷以及其它化合物。它们的同系物中各化合物的相对丰度常与它们在生物体系中的丰度相似，特别是其中的长链正构烷烃（ $>C_{23}$ ）都具有很强的奇数碳优势，这点得到了许多文献充分的论证（Bray和Erans, 1961）。此外，由于化合物之间缺乏热动力平衡（Bestougeff, 1967），以及石油与水体环境形成的沉积岩之间的密切关系，都表明并提出了石油的低温成因<sup>②</sup>。从石油的元素组成（C、H、N、S、O）、同位素组成和近代沉积物中类石油物的存在等方面来看都与低温成因说相一致。最后，即使单独抽出它们其中的某一方面并不足以证明这一点，然而支持生油物质为生物来源的证据似乎仍占了绝对优势（Hunt, 1979），所以，在本章中接受这一论点。

① 参看Porfir'ev (1974) 的石油无机成因的一些新近的观点和Robinson (1963) 关于生物成因和无机成因两个方面的二元论的综合概说。近来，Gold和Soter (1982) 还提出了源于上地幔的大量甲烷气的假说。

② 在本文中，低温系指低于几百度，是相对于表示火成过程特征的700~1200℃温度范围而言的，该火成过程包括硅酸盐熔融在内。