



# 聚能等流度驱油方法

JUNENG DENG LIUDU QUYOU FANGFA

韩修廷 刘春天 盖德林 著

石油工业出版社

# 聚能等流度驱油方法

韩修廷 刘春天 盖德林 著



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书提出了非均质储层多轮次多段塞聚能等流度驱油大幅度提高采收率剂节能降投资的思路;分析了聚能等流度和提高采收率原理;通过油藏数值模拟、室内岩心驱替实验研究,获得了提高采收率减少注剂降低投资的好效果;介绍了现场实施设计、测试、检测、调控和注采工艺等配套技术。它不仅是一种新方法,更是油藏工程基本原理的新发展。

从事油藏工程的广大科技、研究、设计及技术管理人员,可借鉴其新思路、新方法,结合油田实际用于指导油田开发和提高油田采收率的实践。

## 图书在版编目(CIP)数据

聚能等流度驱油方法 / 韩修廷, 刘春天, 盖德林著.

北京: 石油工业出版社, 2009.2

ISBN 978-7-5021-6877-3

I. 聚…

II. ①韩…②刘…③盖…

III. 高聚物 - 化学驱油 - 计算方法

IV. TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 183277 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](http://www.petropub.com.cn)

编辑部: (010) 64523694 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

---

2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 19.25

字数: 490 千字 印数: 1—1000 册

---

定价: 56.00 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

# 前 言

本书针对非均质油层存在优势渗流通道窜流严重，导致低效注水、无效循环和含水上升快，现有堵水技术效果差，堵不住、有效期短等问题；现有提高采收率技术，采用传统驱油方法表现出注剂量大、采收率低、效益差、注剂过早从油井采出等现象；现有的提高采收率技术、调剖堵水技术原理存在着较大潜力和不完善。因此，亟待原理、工艺完善和系统提高。

借鉴大禹治水、江河截流、木桶效应等古人的思路、理念和原理，结合现有驱油技术特点，系统集成发展，提出了多段塞、多轮次聚能等流度调驱的思路和方法，通过提高聚能强度、段塞同步率和双重协同作用，开采难波及区域的滞留原油，大幅度提高采收率，降低水资源用量，降低能耗和投入，提出了聚能等流度的配套实施方法。采用不同性质的驱替剂匹配不同级别的渗透率地层，由高当量黏度至低当量黏度顺序注入，降低高渗透段储层的流度，减缓高渗层流速，迫使后续中、低黏度注剂转向分流进入中、低渗透层，增加低渗透层的流度，实现不同层内的段塞等流度等流速，在地层内的聚能段形成立体封闭（理想）移动柱塞墙，柱塞墙移动截流，提高波及体积。

通过等流度优化设计，提高段塞的同步率，加入高效驱油剂，与聚能、同步驱替互为协同，既提高波及体积，也提高驱油效率，实现调、堵、洗、驱一体化。通过数值模拟研究，模拟了等流度方法提高采收率的趋势和聚能特征。选用不同流度的注剂组成多段塞多轮次驱油，实现了含水大幅度降低，相对水驱提高采收率近 30%（OOIP）。进行了室内驱替实验研究。非均质三层人造岩心的含水最低点由普通聚驱和三元复合驱的 0.2PV 和 0.3PV 推迟到 0.83PV，有效减少了窜流量；总采收率提高到 90%，水驱后采收率提高 50 个百分点；与聚合物驱、三元复合驱、泡沫驱相比，系统注入压力低，采收率高，驱油效果明显改善。

本书的出版，有助于推动提高采收率方法的研究应用，也为各类驱油技术水平的提高提供了基础理论；为该领域的专家探索提高采收率方法起到抛砖引玉的作用。为有效控制注剂用量、降低开采成本和改善油田开发效果，高效开发非均质高含水老油田和提高油田最终采收率提供技术支撑；另外，书稿编写人员及资料来源多出于大庆油田，难免存在着区域的局限性。在感谢大庆油田有关单位和有关同志支持的同时，也提醒广大读者，在参考和应用时，应结合本油田的实际消化吸收。

该思路的提出、研究时间较短，大量的高渗透油田、低渗透油田现场试验正在进行，应用、配套技术将随之逐渐完善，进一步的研究成果，获得的经验将不断地奉献给油田开发事业，服务于提高采收率的应用。

本书是以多年在研究堵水、调剖和提高采收率技术基础上，总结、归纳、提升形成，以刘春天的博士后论文和盖德林的博士论文为基础，通过增加必要的配套内容、集成和系统化，共形成八章内容。在研究、完稿整理过程中，于晓丹、高英、韩梅、白文广、唐许平、莫爱国、李卫彬、梁守成、孙宁武、董宏艳、李俊亮、李晓东、李娟、李明、彭战刚、梅晓娥、黄梅、侯德艳、刘晓杰、付伯舟、孟令伟、覃生高、庞红等做了大量的工作，特

邀了贾振歧、康万利、万新德等教授、专家进行了审阅工作。在此，对于参与研究工作及在书稿整理过程中付出辛勤工作和劳动的有关人员表示衷心感谢。由于作者水平有限，不当之处在所难免，敬请各位专家、同行及广大读者给予指正。

韩修廷

2008年8月

# 目 录

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| <b>第一章 能源和提高原油采收率技术的发展</b>     | (1)   |
| 第一节 石油和能源时代演变                  | (1)   |
| 第二节 提高采收率方法发展现状                | (7)   |
| 第三节 非均质储层提高采收率存在的主要问题          | (22)  |
| 第四节 聚能等流度思路的典故启发               | (27)  |
| 第五节 聚能等流度驱油方法的形成               | (30)  |
| <b>第二章 聚能等流度驱油提高采收率机理</b>      | (32)  |
| 第一节 聚能等流度驱油的理论依据               | (33)  |
| 第二节 聚能等流度驱油方法机理                | (38)  |
| 第三节 分流、聚能（截流）、聚流形成机理及过程        | (52)  |
| 第四节 系统协同作用提高采收率机理              | (61)  |
| 第五节 利用流固微尺度作用实现聚能等流度           | (64)  |
| 第六节 聚能等流度驱油方法的适应条件             | (71)  |
| <b>第三章 段塞优化方法及数值模拟</b>         | (72)  |
| 第一节 数值模拟基本原理及存在的问题             | (72)  |
| 第二节 方案优化方法                     | (77)  |
| 第三节 多段塞驱油数值模拟                  | (83)  |
| 第四节 聚能等流度特征分析                  | (87)  |
| 第五节 聚能等流度气驱数值模拟                | (94)  |
| <b>第四章 室内岩心驱替过程可视化及提高采收率实验</b> | (97)  |
| 第一节 驱油可视化及剩余油迁移                | (97)  |
| 第二节 聚能等流度驱油实验                  | (110) |
| 第三节 实现聚能等流度部分功能驱油实验            | (116) |
| 第四节 聚能等流度探索性实验                 | (121) |
| 第五节 均质岩心实验                     | (141) |
| <b>第五章 聚能等流度注剂及评价</b>          | (146) |
| 第一节 化学驱注剂与地层匹配                 | (146) |
| 第二节 注剂分类                       | (151) |
| 第三节 现有注剂及稳定性                   | (171) |
| <b>第六章 聚能等流度驱储层特征参数和注采动态分析</b> | (177) |
| 第一节 储层静态特征分析                   | (177) |
| 第二节 储层动态特征参数分析                 | (182) |
| 第三节 储层非均质典型动态监测技术              | (185) |
| 第四节 实施效果分析及跟踪调整                | (216) |
| <b>第七章 工艺技术配套及实施设计</b>         | (224) |

第一节 油层改造工艺技术..... (224)

第二节 注入工艺配套技术..... (238)

第三节 采出工艺配套技术..... (249)

**第八章 典型聚能等流度现场试验效果分析..... (267)**

第一节 现有驱油技术聚能等流度效果分析..... (267)

第二节 典型提高采收率现场试验聚能等流度效果分析..... (272)

第三节 现场实施优化设计..... (286)

**参考文献..... (297)**

# 第一章 能源和提高原油采收率技术的发展

能源是人类活动的物质基础，是国民经济和社会发展的重大战略资源。能源能否长期稳定供应已成为关系人类未来生存与文明延续的重要问题。石油是能源的重要组成部分，从一百年前人类工业化利用石油开始，目前已成为社会经济的重要组成部分。从能源的演变更能看出，目前化石燃料仍是人类赖以生存的能源。作为生产石油、天然气的油田开发技术主要经历了一次采油到三次采油的过程。目前正在研究三次采油后的提高采收率新技术，称为四次采油。非均质程度严重的油藏，注入水的长期冲刷导致流体沿高渗区窜流，注水系统低效循环，针对现有技术解决不了中低渗透层波及程度较低的问题，从大禹治水、江河截流等六种典故、原理中得到启示，结合油田开发实际、发展集成于系统，提出聚能、剖面等流度等概念；提出多段塞多轮次聚能等流度驱油方法，总体思路包括提高采收率的机理、技术措施和总体目标三部分。通过该原理、技术的实施，可实现大幅度提高采收率、节省注剂、节能、降投资的总体目标。

## 第一节 石油和能源时代演变

### 一、主体能源消耗时代演变

#### 1. 传统能源时代

从火的利用和燃烧薪柴开始，人类可以做饭和取暖，完全区别于其他动物，从此逐步增强了人类抵抗恶劣自然环境的能力，世代繁衍进步。直到 19 世纪末，世界能源仍以薪柴等传统能源为主（图 1-1）。

#### 2. 煤炭时代

19 世纪末，蒸汽机的应用促进了煤炭的开发。20 世纪初期，煤炭在能源消费结构中的比例上升到 60%，完成了煤炭取代薪柴的能源转化过程。

#### 3. 石油时代

随着石油资源的发现与石油工业的发展，世界能源结构发生了第二次转变。20 世纪初期，石油开始成为各种机器、运输工具和军用机械动力的主要来源。1965 年，世界石油产量达到  $15.7 \times 10^8 \text{t}$ ，在能源消费结构中的比例达到 39.4%，逐渐成为主导能源。国际能源机构（IEA）对未来世界能源需求进行预测，指出 2030 年以前，化石燃料仍将是主要的能源供应来源。

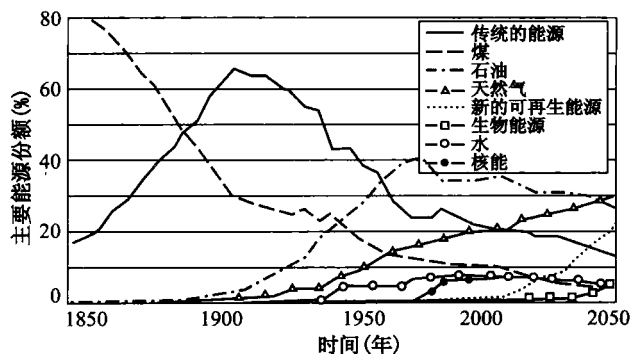


图 1-1 世界能源消费结构演化趋势图  
（壳牌公司，2001 年，修改）

#### 4. 地层气时代

人类使用地层气的历史较早。目前,应用量仅次于石油,已超过其他任何能源。地层气的开发利用正方兴未艾,有望在 21 世纪中叶超越石油和煤炭,成为第一大能源。

#### 5. 新能源时代

为了保障人类社会的可持续发展,世界各国正在开展新能源的研究与开发,推动了原子核能、太阳能、风能、海洋能、地热能、生物质能和氢能等新能源和可再生能源的发展,最终将取代矿物能源。

#### 6. 化—石能源时代的角色演变

19 世纪下半叶人类应用化—石能源(指石油、天然气)逐渐增多,近几十年以来,石油在世界经济增长的关键时期发挥了重要作用,为世界财富增长作出了不可磨灭的贡献。无论是发达国家还是发展中国家,其工业化里程都是从石油能源的大量消耗起步。石油,作为当今社会的基础能源,带动了世界经济的腾飞。但人类大规模地利用天然气、地层气也是从 19 世纪下半叶起步,近 40 年,天然气、地层气发展速度比石油快,化—石能源合计到 1975 年在能源中所占比例达到高峰,超过 50%,预计到 2050 年仍占 50% 以上的高比例水平(图 1-2),但石油比例有所下降,天然气的比例不断上升,有望在 2050 年前,超过石油的应用比例。

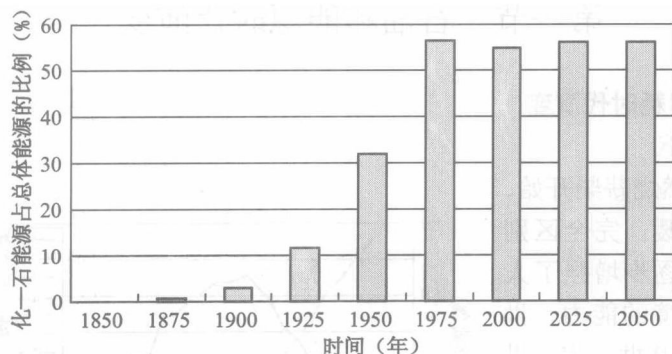


图 1-2 化—石能源占总体能源比例

#### 7. 石油消耗量

石油是不可再生资源,具有数量有限性以及分布不平稳性的特征,且在能源消耗中所占的比例逐渐增大。

2004 年,全世界能源消费总量为  $102.24 \times 10^8 \text{t}$  油当量,比上年增长 4.32%。其中,中国能源消费量为  $13.86 \times 10^8 \text{t}$  油当量,增长 15.11%,占世界能源消费量的 13.56%,居美国之后,是世界第二大能源消费国。世界能源生产总量及增长率均高于能源消费总量及增长率;中国趋势相反,能源生产量及增长率均低于能源消费量及增长率。

1982 年,世界石油消费量为  $28 \times 10^8 \text{t}$ ,2002 年增至  $35 \times 10^8 \text{t}$ ,20 年间增长了  $7 \times 10^8 \text{t}$ ,年均增长 1.5%。其中,北美、欧洲和亚太三大地区 2002 年石油消费量为  $29.82 \times 10^8 \text{t}$ ,占世界消费量的 85.2%。独联体各国经济出现滑坡,石油消费量剧降,从 1990 年的  $4.2 \times 10^8 \text{t}$ ,降至 2000 年的  $1.73 \times 10^8 \text{t}$ ,下降约 60%。亚太地区发展中国家经济快速发展,石油需求剧增,从而带动整个地区石油消费由 1985 年的  $5 \times 10^8 \text{t}$  增至 2002 年的  $9.92 \times 10^8 \text{t}$ ,增长了  $4.92 \times 10^8 \text{t}$ ,约占同期世界石油消费增长量的 67%。1992 年以来,亚太地区的石油消费

量已超过欧洲，成为世界第二大石油消费区，与北美、欧洲一起呈现三足鼎立之势。2002年前七大石油消费国中有四个国家在亚太地区，其中，中国排第二，日本排第三，韩国排第六，印度排第七。

2004 年，全世界原油生产量为  $38.68 \times 10^8 \text{t}$ ，比上年增长 4.45%。其中，中国原油生产量为  $1.75 \times 10^8 \text{t}$ ，增长 2.90%，占世界份额的 4.91%。全世界石油消费量为  $37.67 \times 10^8 \text{t}$ ，增长 3.44%。其中，中国石油消费量为  $3.09 \times 10^8 \text{t}$ ，增长 15.83%，占世界份额的 8.20%，列世界第二位。

8. 能源消耗量

美国能源信息署对全世界各种能源消费量进行预测，21 世纪上半叶全球能源消费仍以化石能源为主。未来几十年，石油仍将发挥重要作用（图 1-3）。

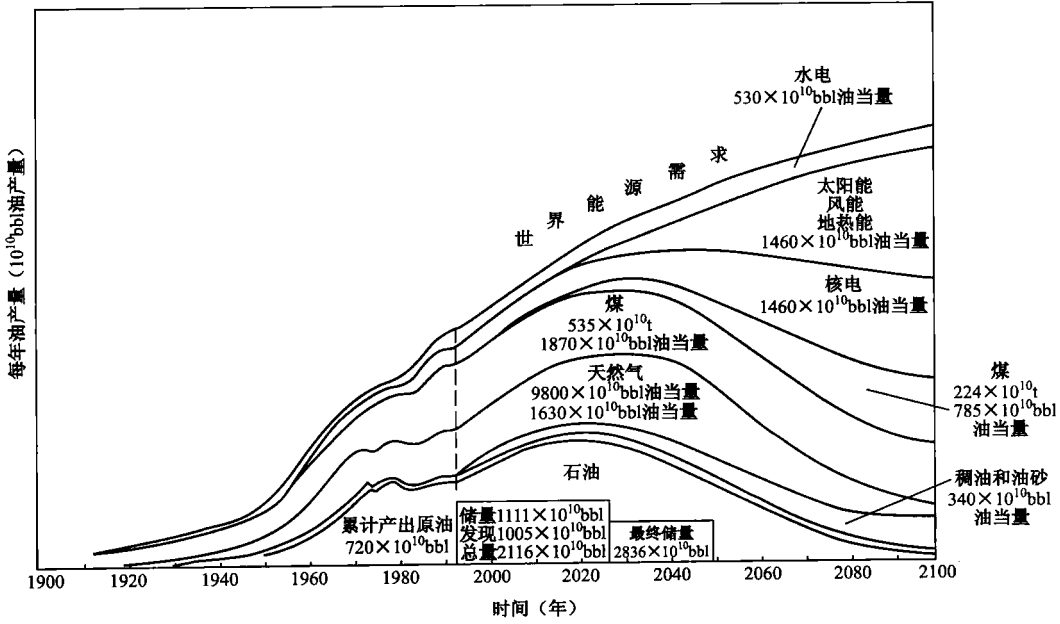


图 1-3 全球能源消费量  
(1bbl=0.159m<sup>3</sup>)

在全球范围内寻求可靠、稳定、合理价格的石油供应，谋求石油安全，以保证经济持续增长，已经成为各国的一项重要发展部署。

二、石油资源潜力

石油资源可以分为三类：已探明储量（已探明但未开采的石油）、储量增长值（主要由于技术因素增加了油气的采收率，导致储量的增加）和待发现储量（有待通过勘探发现的资源）。

1. 国际石油资源潜力

2004 年年底，中国工程院经研究得出结论，全球油气资源总量十分丰富。其中，石油采出量为 26%，剩余探明可采储量 32%，待发现储量 42%；天然气采出 15%，剩余探明储量 37%，待发现可采储量 48%（表 1-1）。美国、俄罗斯、中南美洲以及非洲的储量增长较快，俄罗斯和中南美洲的未发现储量较大。

表 1-1 国际石油资源潜力

| 构 成          | 石油 ( $10^6\text{t}$ ) | 天然气 ( $10^{12}\text{m}^3$ ) |
|--------------|-----------------------|-----------------------------|
| 全球可采资源量 (常规) | 5031                  | 488                         |
| 累计采出量        | 1305                  | 71                          |
| 剩余探明可采储量     | 1619                  | 180                         |
| 待发现可采资源量     | 2107                  | 237                         |

## 2. 国内石油资源潜力

中国作为石油生产与消费大国,进入 20 世纪 90 年代以来,原油产量和可采储量逐步提高 (图 1-4)。我国石油储量正处于高基值稳定增长的早—中期阶段,未来石油储量稳定增长的周期还很长,可能延至 2035—2040 年。

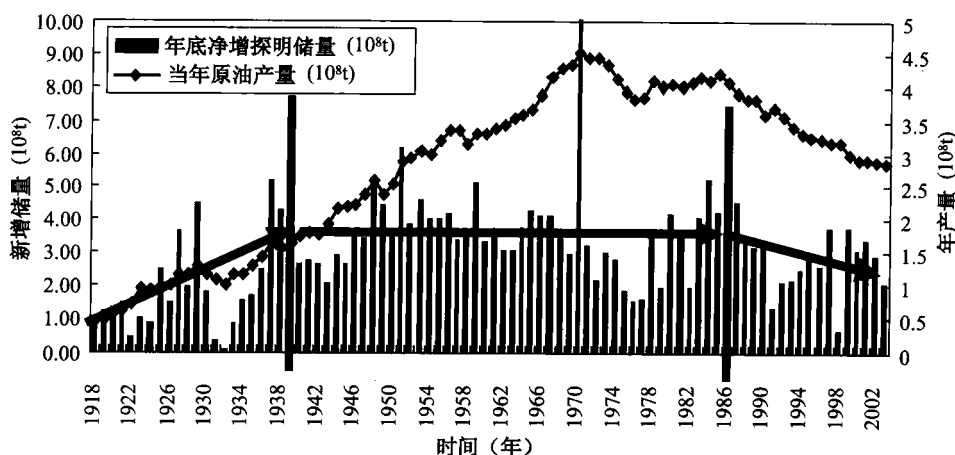


图 1-4 中国石油新增储量和年产量

目前,我国天然气储量正处于快速增长的初期阶段 (图 1-5)。预计未来 20 年左右,我国常规天然气产量将由目前的  $400 \times 10^8\text{m}^3$  增长到  $2000 \times 10^8\text{m}^3$  以上,天然气产量有望超过石油。

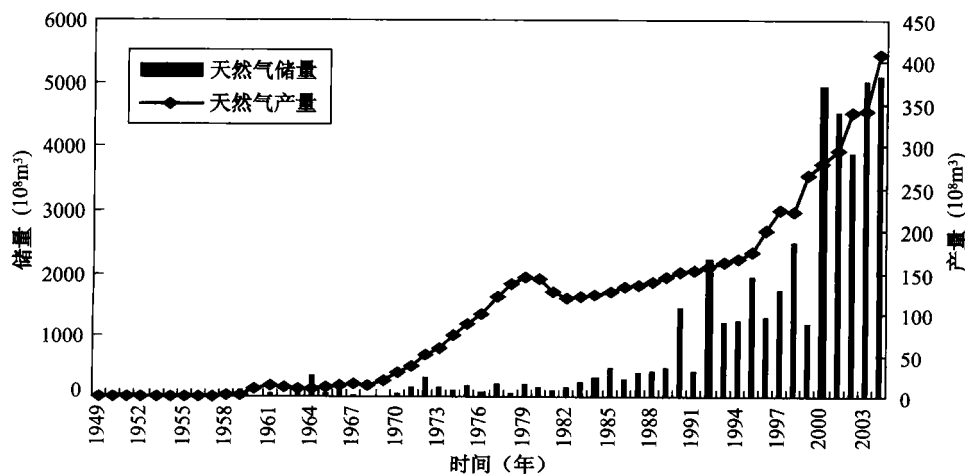


图 1-5 中国年增天然气储量变化趋势

### 三、科技推动石油资源新发现

油气资源蕴藏量是固定的，但科技发展深化了人类对石油资源的认识，所以石油可采储量随着科技进步不断增多。

世界石油大会对全球资源量的评价结果显示，20 世纪 40 年代全球石油资源量仅为  $500 \times 10^8 \text{t}$ ，1994 年达到了  $3113 \times 10^8 \text{t}$ ，2000 年达到  $4138 \times 10^8 \text{t}$ ，比 1994 年提高了 32.9%，2005 年已达  $5031 \times 10^8 \text{t}$ （图 1-6），石油工业仍具有广阔的发展空间。随着理论与技术进步，未来全球资源量还会不断增长。

科技进步在提高人们发现资源能力的同时，也不断提高了人类开发油气的本领。在过去一百多年的石油勘探开发历程中，全球石油产量实现了三次跨越式增长。

第一次是 20 世纪 20—30 年代，地震反射波法、内燃机钻机和牙轮钻头等技术被广泛应用，世界石油产量从  $1 \times 10^8 \text{t}$  增长到  $2 \times 10^8 \text{t}$ ；第二次是 20 世纪 60—70 年代，板块构造、注水采油、喷射钻井等新理论和新技术的出现使世界石油产量由  $10 \times 10^8 \text{t}$  跨越到  $20 \times 10^8 \text{t}$ ；第三次是 20 世纪 90 年代以来，世界石油产量稳定在  $30 \times 10^8 \text{t}$  以上，期间盆地模拟、水平钻井、三维地震勘探以及三次采油技术为此作出了巨大贡献。

### 四、石油短缺与油价变化

由于石油资源丰富、供应可靠、便于运输，全球对石油的需求不断增长。

#### 1. 国际石油短缺

从 20 世纪 80 年代开始，全球新发现的储量已跟不上开采量，未来世界的石油供求形势将更加紧张。预计到 2050 年，世界油气的供求差将达到  $220 \times 10^8 \text{bbl/a}$ （图 1-7）。

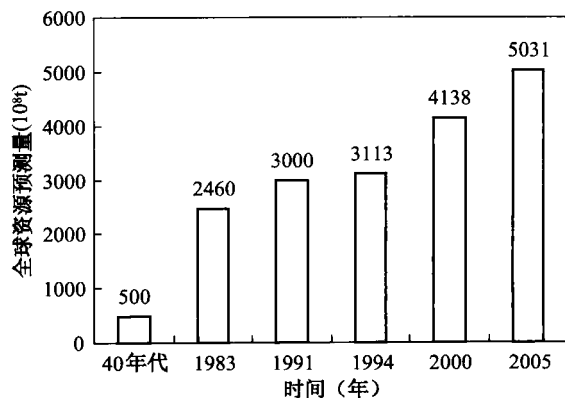


图 1-6 不同时期世界石油大会对全球资源量预测结果  
(资料来源: EIA; USGS and Colin Campbell)

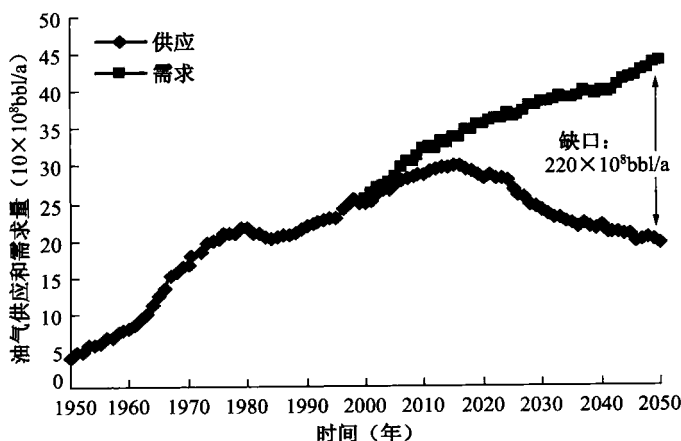


图 1-7 世界油气供应与需求量

2050 年前全球地区供需不平衡矛盾会进一步加剧，亚太地区供需缺口进一步加大（表 1-2）。

表 1-2 全球各地区石油供需状况表

| 地区 \ 时间 (年) | 2010 | 2020 | 2030  | 2040  | 2050  |
|-------------|------|------|-------|-------|-------|
| 中东          | 9.7  | 11.4 | 13.5  | 14.7  | 15.4  |
| 非洲          | 3.1  | 3.3  | 3.1   | 1.8   | 0     |
| 独联体         | 4.4  | 4.7  | 5.1   | 5.6   | 5.6   |
| 欧洲          | -3.9 | -4.7 | -5.2  | -4.2  | -3    |
| 亚太          | -7.5 | -9.5 | -11.2 | -13.3 | -14.6 |
| 北美          | -5.4 | -6.2 | -6.7  | -5.9  | -4.3  |
| 中南美         | 2.6  | 2.0  | 1.4   | 1.3   | 0.9   |

注：表中数据为产量与需求量的差值，单位为 10<sup>6</sup>t。

2. 世界油价变化

国际原油价格持续攀升，见图 1-8。

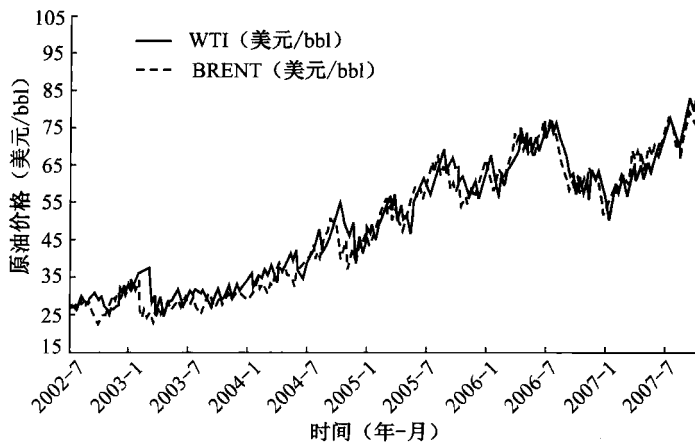


图 1-8 近年世界石油价格

油价的大幅上涨对世界各国的经济影响较大。在历史上的两次石油危机中，西方发达国家经济受冲击的程度大于不发达国家。但在 2000 年世界油价涨到将近 40 美元 /bbl 的高价时，发达国家经济受影响程度明显减小，而一些发展中国家却深受其害：债务危机、政府危机、社会危机、动乱等各种政治经济社会问题不断爆发，油价的大幅上涨对加速加深这些问题的爆发起着推波助澜的作用。2000 年世界一些权威机构估算，油价上涨 10 美元 /bbl，并在这个价位上保持一年，对发展中国家经济增长率的影响是世界平均水平的 1.5 倍，是发达国家的 3 倍。

从国民经济的三个因素消费、出口和投资看，油价上升对我国国民经济发展是不利的。据国际货币基金组织预测，石油涨价 10 美元 /bbl，亚洲经济增长速度下降 0.8%。从进口方

面来看，油价高，石油进口越多，外汇支出越大。从出口方面来看，石油价格越高，下游产品生产成本增加，出口产品竞争力下降，出口受到很大影响。从交通运输来看，石油价格越高，成品油价格上升，运输成本增加，推动生产资料及消费品价格走高。总之，石油价格上升对我国国民经济总体是不利的。若石油对外依存度继续提高，影响会越来越大。

3. 国内石油短缺

随着国民经济的迅速增长，我国石油消费的增长速度远大于生产的增长速度。1993年起，中国已成为石油净进口国；2004年石油表观消费量达  $2.92 \times 10^8 \text{t}$ ，而原油产量仅  $1.75 \times 10^8 \text{t}$ ，进口石油  $1.17 \times 10^8 \text{t}$ ，原油对外依存度已达 40.1%。2006年中国石油消费达  $3.28 \times 10^8 \text{t}$ ，已跻身于世界石油消费大国行列。

带动中国石油需求增长的主要动力是交通运输业、石化和农业等产业，在“十一五”时期将会继续得到发展和关注。未来 20 年仍将是中国经济增长的关键时期，保持经济持续、快速、健康增长的目标，决定了中国石油需求在很长一段时间内必将保持继续增长势头。

根据中国工程院战略规划研究结果，未来中国自产石油供给的缺口将不断增大。2020 年我国原油产量将保持在  $(1.8 \sim 2.0) \times 10^8 \text{t}$ ，需求将达到  $(4.3 \sim 4.5) \times 10^8 \text{t}$ （图 1-9），进口原油占需求的比例达到 52% ~ 60%。2060 年，需求将达到  $8 \times 10^8 \text{t}$ ，对外依存度高达 75%，石油安全受到严重威胁，要求已开发油田提高采收率，增加产量。

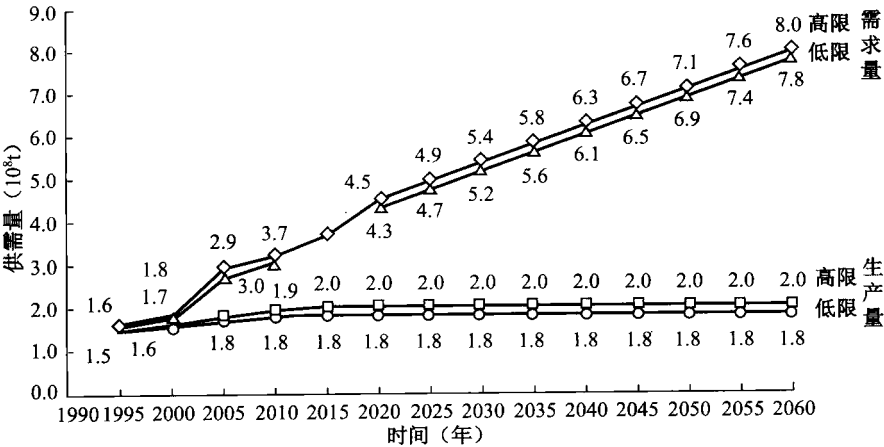


图 1-9 国内原油供需预测图

第二节 提高采收率方法发展现状

油田开发过程主要分为三个阶段。一次采油是依靠地层本身能量开采，产量约占蕴藏总量的 15% ~ 20%。二次采油是在地层能量释放以后，用人工注水或注气的方法增补油藏能量开采原油，采收率为 20% ~ 40%。二次采油接近或达到经济极限时，从地面注入各种驱油介质进行开采，如化学物质、溶剂和热载体等，称为三次采油，采收率为 45% ~ 60%。国内外现有的采油技术以二次采油和三次采油为主。目前正在研究三次采油后的提高采收率新技术，称为四次采油。提高采收率技术经历了从一次采油到四次采油，从一元驱替到多元驱替的发展过程（图 1-10）。

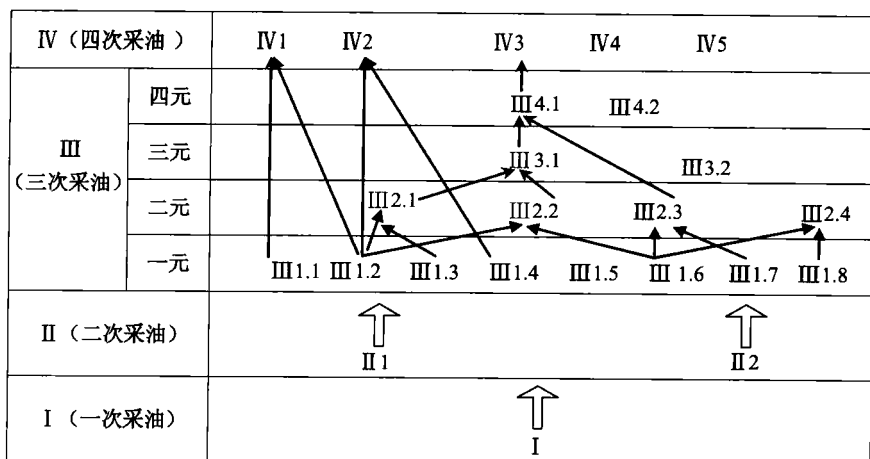


图 1-10 现有提高采收率技术发展过程

注：I—弹性驱（利用油层天然能量）；

II—恢复地层能量：II 1—水驱、II 2—以保压为目的注气；

III—以提高采收率为目的：III 1.1—微生物驱、III 1.2—聚合物驱、III 1.3—碱水驱、III 1.4—油层调剖、III 1.5—物理法、III 1.6—表面活性剂、III 1.7—气驱、III 1.8—热采、III 2.1—AP/PA 复合驱、III 2.2—SP/PS 复合驱、III 2.3—泡沫驱、III 2.4—热采化学复合驱、III 3.1—三元复合驱、III 3.2—聚能等流度调驱、III 4.1—四元泡沫复合驱、III 4.2—聚能等流度调驱；  
IV—三次采油后提高采收率技术：IV 1—聚驱后微生物驱、IV 2—聚驱后深部调驱、IV 3—多元泡沫复合驱、IV 4—聚能等流度调驱、IV 5—其他多元复合驱

利用各种技术提高原油采收率的方法统称为 EOR，主要包括化学驱、气驱、热采和微生物驱等。EOR 方法的分类见图 1-11。

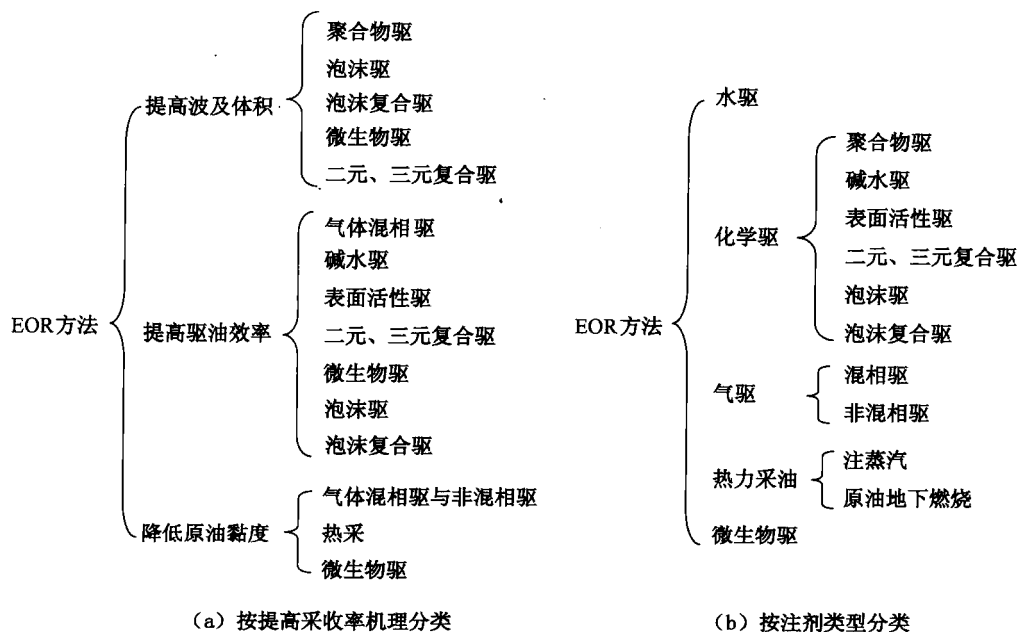


图 1-11 EOR 方法分类

全球采用 EOR 技术的油藏主要是砂岩油藏，其次是数量不多的碳酸盐岩油藏。2006 年世界 EOR 产量为  $8716 \times 10^4 \text{t}$ 。

气驱和热采是 EOR 中的主导技术。气驱在全球的产量最高, 占 50% 左右。其中, 注天然气产量占 25%, 注  $N_2$  产量占 19%, 注  $CO_2$  产量占 6% 左右。近年来, 国外大力开展了注  $CO_2$  技术的研发和应用, 尤其是随着减少温室气体排放成为全球关注的焦点,  $CO_2$  的捕集储存和  $CO_2$  提高采收率技术相结合成为研究的热点,  $CO_2$  驱项目的数量与日俱增。2006 年美国 EOR 项目共计 153 个, 其中 82 个是  $CO_2$  项目。国际能源机构 (IEA) 评估认为, 世界适合注  $CO_2$  开发的资源为  $3000 \times 10^8 \sim 6000 \times 10^8 \text{ bbl}$ 。

热采是非常有效的提高采收率方法, 应用程度位居第一, 尤其是在加拿大, 蒸汽吞吐和蒸汽辅助重力驱是开采油砂的最主要经济方法。热采产量仅次于注气技术, 占 40% 左右。

聚合物化学驱产量占 8% 左右, 主要集中在中国; 微生物驱等提高采收率技术占比例很小, 目前尚不成熟。

国内油田主要采用以聚合物驱为主的三次采油技术。2005 年, 三次采油年产量达到  $1000 \times 10^4 \text{ t}$  以上, 占年总产油量的 27%, 工业化区块提高采收率 12 个百分点左右。截至 2006 年 9 月 25 日, 应用三次采油技术累计产油突破  $1 \times 10^8 \text{ t}$ , 成为世界最大的三次采油研发、生产基地。为适应建设百年油田的需要, 正加快推进二类油层聚驱、三元复合驱、微生物驱等技术的发展。

## 一、一次采油

大多数油藏都经历了“一次采油”阶段, 即利用油藏本身的天然能量开采原油。一次采油机理主要包括: 油藏压力下降, 流体体积膨胀和岩石压缩作用将油藏流体驱入井筒。当油藏压力降低到原油的饱和压力以下时, 气体释放和膨胀又驱出部分原油。有些油藏带有气顶, 气顶膨胀和重力排驱也能促使原油流入生产井。与含水层相连的油藏能提供活跃的或部分活跃的水驱。含水层的水侵既能驱替油藏孔隙中的原油, 又能弥补由于原油开采造成的压力下降。

从早期石油开采到 20 世纪 30 年代初期, 大多数油藏都利用一次采油机理进行开采, 直到经济极限产量为止。一次采油的采收率取决于开采机理和各种机理的组合、油藏类型、岩石性质、原油性质等, 一般为 5% ~ 20% [2]。

## 二、二次采油

二次采油的主要方法是注水或非混相注气, 延缓或防止油藏压力下降, 最终采收率约为地质储量的 20% ~ 40%。

### 1. 水驱

水驱作为一种最早的加速采油方法, 在世界范围内得到广泛应用。水驱是以水作为驱替剂, 将原油从注入井向生产井推进的过程。注水工艺按注入通道可分为油管注水 (正注)、油套环空注水 (反注) 与油套管同时注水 (合注); 按是否分层又可分为笼统注水与分层注水。

在结构复杂的多孔介质中, 水驱油会形成无数条微观流动通道, 各通道内的油水界面以不同速度向前推进。经过一定时间后, 某些孔隙中形成了水的连续通道, 而相当多的孔隙内仍然存在小油区。继续注水, 一些油可被水驱动, 小的油区又逐渐被水分隔成更小的油区。长期注水后, 最终形成不流动的小油滴。由此可见, 宏观水波及到的油区内微观上仍然存在未洗涤的油。当水波及区随着注水时间及注入量的增加扩大到生产井底时, 油井便出现油水同产期; 当油井含水率及产油量达到经济极限值时, 结束注水开发期 [3]。

油水黏度比是影响水驱采收率的重要因素。油水黏度比使注入水沿不同渗透层段的推进速度产生差异,导致油层水淹不均匀,采收率降低(图 1-12)。当油水黏度比 $\mu_o/\mu_w$ 在 0.1 ~ 50 区间内变化时, $\mu_o/\mu_w$ 对开发效果的影响很大; $\mu_o/\mu_w$ 超过 50 以后,影响减小。

对于非均质性严重的油藏,油水黏度比的影响更加明显。采用水油流度比描述地层非均质性和油水黏度比对采收率的影响,水油流度比、波及体积和渗透率变异系数的关系,如图 1-13 [4] 所示。

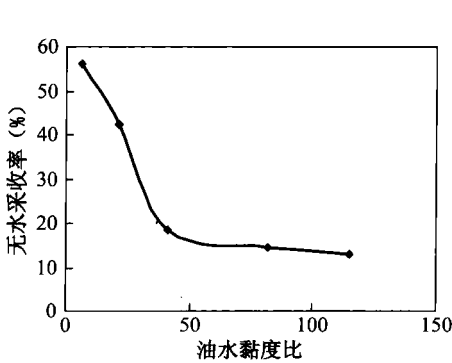


图 1-12 油水黏度比对无水采收率的影响

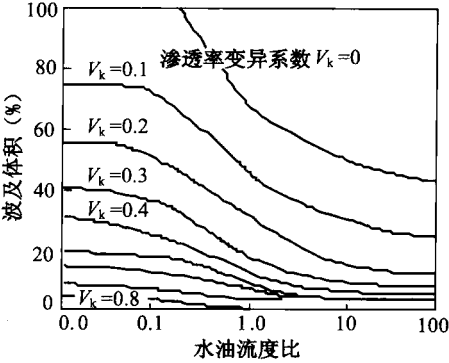


图 1-13 水油流度比、波及体积和渗透率变异系数的关系

从图 1-13 可以看出,水油流度比越小,渗透率变异系数越小,波及体积越高。渗透率变异系数越大,注入水越容易沿高渗透层窜流。当高渗透层水淹以后,水相的相渗透率随之上升,纵向上的流度比相差越来越大,注入水很难扩大波及范围。

由于水驱窜流大、洗油效率低,水驱采收率可达到 30% ~ 40%。

2. 注气

注气作为二次采油方法,得到了一定程度的应用。注入油藏的气体,包括 CO<sub>2</sub>、天然气、N<sub>2</sub>、烟道气、空气等。近期低渗油田研究注入空气低温氧化,注空气时因所含的氧与油气中的气体相混合,有引起爆炸的危险,此外,还有腐蚀等问题,正在逐步解决。

油藏是否注气取决于油藏的地质条件和有无气体来源。二次采油方法中,注气不如注水普遍。近年来,从研究混相和非混相气驱出发,高压注气技术又有新的发展。

三、三次采油

三次采油是二次采油进一步提高采收率的方法,主要有化学驱、热采、微生物驱等技术,驱替二次采油后油藏剩余的不连续的难采原油,结合大庆油田三次采油的实践,这里重点介绍化学驱的一元驱、二元复合驱、三元复合驱、四元复合驱。

1. 一元驱

(1) 调剖。

调剖堵水是指通过物理或化学方法堵塞高含水油层中的水流通道,调整流度,迫使注入水进入高含油地层,提高采油效率的一种配套方法。三次采油过程中,调剖堵水也是提高化学剂驱油效率的主要手段,调剖堵水技术水平的高低直接关系到三次采油的效果。

按堵剂在地层中的位置,调剖可分为渗滤面调剖、近井地带调剖和深部调剖。

近井及渗滤面调剖方法主要在近井高渗带内形成堵塞段塞,调剖半径不大,当注入水进入低渗带超过堵剂位置以后,产生纵向渗流,重新进入高渗带,增产有效期短、效果差,提高波及体积的程度有限。