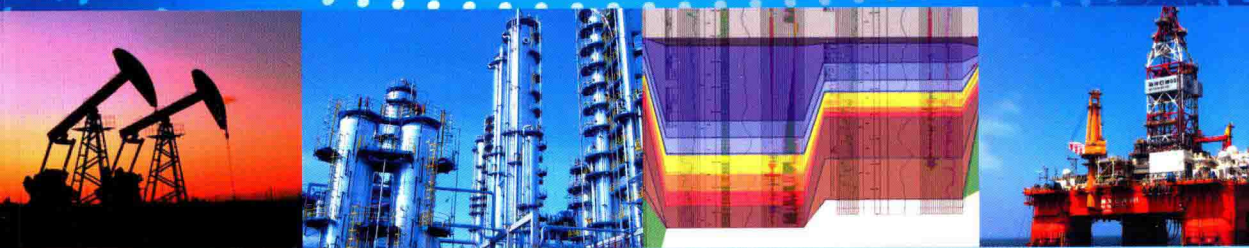


# 世界石油工业关键技术发展 回顾与展望

SHIJIE SHIYOU GONGYE GUANJIAN JISHU FAZHAN  
HUIGU YU ZHANWANG

何艳青 饶利波 杨金华 © 主编



石油工业出版社

# 世界石油工业关键技术发展 回顾与展望

何艳青 饶利波 杨金华 主编



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书从地质、油气田开发、物探、测井、钻井、炼油和化工7个专业领域全面回顾了世界石油工业关键技术的发展历程,归纳总结了发展特点及趋势,重点介绍了各专业领域的重大关键技术,展望了未来20年技术发展前景,对一些重要的超前储备技术进行了重点描述与分析,最后得出结论与启示。

本书可作为石油工业上下游的科技管理人员、科研人员、生产技术人员以及大中院校师生的参考用书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

世界石油工业关键技术发展回顾与展望 / 何艳青, 饶利波, 杨金华主编. —北京: 石油工业出版社, 2017. 2

ISBN 978-7-5183-1768-4

I. 世…

II. ①何… ②饶… ③杨…

III. 石油工业-技术发展-世界

IV. TE-11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 010603 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](http://www.petropub.com)

编辑部: (010) 64523583 图书营销中心: (010) 64523633

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

---

2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 22

字数: 550 千字

---

定价: 160.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

# 《世界石油工业关键技术发展回顾与展望》

## 编 委 会

主 编：何艳青 饶利波 杨金华

成 员(按章节顺序)：

何艳青 饶利波 杨金华 胡秋平 孙乃达

张焕芝 张华珍 田洪亮 李晓光 刘 兵

朱桂清 杨 虹 曹文杰 郭晓霞 王祖纲

刘雨虹 杨 艳

# 前 言

进入 21 世纪以来，油气工业技术发展很快，回顾过去 10 年的发展历程，可以归纳总结出石油工业技术发展的规律、特点和趋势，并对未来技术发展做出预判，对指导我国石油工业技术的发展有重要的意义。因此，中国石油集团经济技术研究院承担并完成了中国石油集团科技发展部下发的软科学研究课题——“世界石油工业关键技术发展 10 年回顾及 2030 年展望”。课题组分析总结了地质、油气田开发、物探、测井、钻井、炼油和石油化工 7 个专业过去 10 年行业发展的特点与趋势，以及专业关键技术过去 10 年的发展历程、特点、现状与趋势，对各专业当前重大关键技术进行了重点介绍，对未来 20 年技术发展进行了展望，对超前储备技术进行了重点描述与分析，最后得出结论与启示。本书正是在回顾与展望各专业的基础上编写而成。本书可为我国石油工业全面把握世界石油科技发展方向和前沿趋势，判断内外部发展环境，掌握竞争对手的科技发展战略与策略，为制定科技发展战略、规划等重大科技决策提供支撑。

本书共 8 章，第一章由何艳青、饶利波、杨金华编写，第二章由胡秋平、孙乃达编写，第三章由张焕芝、张华珍、田洪亮编写，第四章由李晓光、刘兵编写，第五章由朱桂清、杨虹、曹文杰编写，第六章由杨金华、郭晓霞编写，第七章由王祖纲编写，第八章由刘雨虹、杨艳编写。

课题组在课题研究及报告编写过程中得到了中国石油天然气集团公司科技发展部、相关专业公司及研究院所的大力支持，在此一并表示感谢。

由于水平有限，书中难免出现错误或不妥之处，敬请指正。

编 者

2016 年 11 月

# 目 录

第一章 概述 .....	( 1 )
第一节 科技进步对世界石油工业发展的推动作用 .....	( 1 )
第二节 10 年来世界石油工业关键技术发展的特点与趋势 .....	( 3 )
第三节 未来 20 年世界石油工业技术发展展望 .....	( 7 )
第四节 建议 .....	( 15 )
第二章 世界石油地质勘探关键技术发展回顾与展望 .....	( 18 )
第一节 地质勘探技术发展 10 年回顾与趋势分析 .....	( 18 )
第二节 未来 20 年重要地质勘探技术发展展望 .....	( 32 )
第三节 结论与启示 .....	( 34 )
参考文献 .....	( 36 )
第三章 世界油气田开发关键技术发展回顾与展望 .....	( 37 )
第一节 开发技术发展 10 年回顾与趋势分析 .....	( 37 )
第二节 未来 20 年开发技术发展展望 .....	( 66 )
第三节 结论与启示 .....	( 83 )
参考文献 .....	( 84 )
第四章 世界石油地震勘探关键技术发展回顾与展望 .....	( 86 )
第一节 过去 10 年地震勘探技术发展历程回顾与趋势分析 .....	( 86 )
第二节 未来 20 年技术发展展望 .....	( 110 )
第三节 认识与启示 .....	( 112 )
参考文献 .....	( 113 )
第五章 世界石油测井关键技术发展回顾与展望 .....	( 115 )
第一节 测井技术发展 10 年回顾与重大关键技术 .....	( 115 )
第二节 未来 20 年测井技术发展展望 .....	( 139 )
第三节 认识与启示 .....	( 152 )
参考文献 .....	( 153 )
第六章 世界石油钻井关键技术发展回顾与展望 .....	( 155 )
第一节 钻井技术发展 10 年回顾与趋势分析 .....	( 155 )
第二节 未来 20 年钻井技术发展展望 .....	( 207 )
第三节 结论与建议 .....	( 238 )
参考文献 .....	( 244 )
第七章 世界炼油关键技术发展回顾与展望 .....	( 245 )
第一节 炼油技术发展 10 年回顾与趋势分析 .....	( 245 )

第二节 未来 20 年炼油技术发展展望 .....	(298)
第三节 结论与启示 .....	(309)
参考文献 .....	(309)
<b>第八章 世界石油化工关键技术发展回顾与展望 .....</b>	<b>(312)</b>
第一节 石油化工技术发展 10 年回顾与趋势分析 .....	(312)
第二节 未来 20 年石油化工技术发展展望 .....	(329)
第三节 结论与启示 .....	(340)
参考文献 .....	(341)

# 第一章 概述

21 世纪以来, 技术进步推动世界石油工业技术水平迈上一个新台阶。对世界石油工业的发展进行了回顾与展望, 深度剖析了科技进步对世界石油工业发展的推动作用, 分析总结了 10 年来世界石油工业关键技术发展的特点与趋势, 对世界石油工业重大关键技术进行了重点描述, 并对未来 20 年世界石油工业技术的发展进行了展望, 最后针对国内实际提出建议。

## 第一节 科技进步对世界石油工业发展的推动作用

回顾 10 年来世界石油工业的发展, 可以看到油气工业发展面临的形势越来越复杂, 全球能源结构正在历经向多元化、低碳化方向发展的革命性变革, 油气工业正在从常规油气向非常规油气发展, 从陆上向滩海、深水、超深水发展, 从浅层向深层、超深层发展, 从自然环境较好地区向边远地区、复杂山地、沙漠、极地等恶劣环境发展, 地下勘探目标从构造圈闭向隐蔽构造转变。总之, 未来世界石油工业发展将面临自然环境恶劣化、资源品质劣质化、油气目标复杂化、安全环保严格化和能源结构多元化的严峻挑战。科技创新已成为推动和引领未来全球石油工业发展的重要引擎。

(1) 科技进步不断深化了人类对世界油气资源的认识, 资源评价日益深入, 油气勘探成功率不断提高。

油气资源是不可再生的, 也是有限的, 但人们对资源的认识过程是不断深化的。随着科技的进步, 全球油气可采资源量不同时期的评价结果总体呈上升趋势。据 2000 年美国地质调查局(USGS)的评价, 全球常规油气可采资源量分别为  $3.34 \times 10^{12}$  bbl 和  $15.4 \times 10^{15}$  ft<sup>3</sup>; 全球非常规石油资源非常丰富, 早在 20 世纪 70 年代, MASTERS 和 HOLDITCH 等专家就提出了资源三角理论, 即常规资源仅占油气总资源的一小部分, 大部分是致密砂岩气、页岩气、煤层气、重油、超重油、页岩油和天然气水合物等非常规油气资源; 近年来, 雪佛龙公司和得克萨斯 A&M 大学联合对美国 7 大成熟盆地进行资源评价, 结果表明常规油气仅占总资源量的 10%~20%, 其余 80%~90% 为非常规油气。进一步证实了资源三角理论的有效性。

随着三维地震、水平井、深水勘探、电磁测量等重大关键技术的进步, 全球各地探井成功率不断提高, 以美国为例, 从 1990 年到 2010 年的 20 年间, 探井成功率提高了 1 倍, 从 30% 提高到 60% 以上; 探井数占比稳步下降, 从 1990 年的 16% 下降到 2010 年的 8%, 降幅达 50%; 单井发现储量大幅度提高。油气勘探领域不断向深水、超深水、深层、超深层、高温高压、沙漠、高山、极地、非常规油气等环境恶劣、目标复杂区域扩展。

(2) 科技进步和创新推动全球石油产储量不断增长, 油气采收率不断提高。

20 世纪 80—90 年代以来, 盆地模拟、三维地震、水平钻井、三次采油等技术的突破, 使全球原油年产量突破  $30 \times 10^8$  t; 21 世纪以来, 以地质导向、旋转导向钻井、水平井多级压裂、随钻测井、超高密度数据采集与处理、超深水电磁测量、最大油藏接触(MRC)等新型



建井技术的发展和應用，推动全球油气产储量持续提高，原油产量突破  $40 \times 10^8 \text{t}$ 。2000—2010 年 10 年间，原油探明储量从  $1513.6 \times 10^8 \text{t}$  增长到  $1894.8 \times 10^8 \text{t}$ ，增长 25%，年产量从  $37.4 \times 10^8 \text{t}$  增长到  $41 \times 10^8 \text{t}$ ，增长 9.6%；天然气探明储量从  $154.3 \times 10^{12} \text{m}^3$  增长到  $187.1 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，年产量从  $24134 \times 10^8 \text{m}^3$  增长到  $31933 \times 10^8 \text{m}^3$ ，增幅为 32%。

在资源劣质化不断加剧的情况下，全球常规原油平均采收率约为 35%，非常规原油采收率约为 22%，常规天然气的平均采收率为 61%。随着技术的进步，不同类型油藏采收率持续提高，许多油田或区块采收率达到了 50% 以上，许多作业者或组织也不断提高采收率目标，如挪威大陆架组织将采收率目标定在 55%，美国能源部将采收率目标定在 60%，石油工程师协会将采收率目标定在 70% 以上。

(3) 科技进步不断突破油气勘探开发新领域，深水超深水油气资源得到规模开发。

随着海上三维地震技术、可控源电磁测量技术、水平井/大位移井钻井技术、智能完井技术、多缆大型深水物探船、新型深水半潜式钻井平台、海洋深水工程重大装备、海底生产系统、多相混输等关键技术与装备的发展和完善，全球深水油气勘探开发 10 年来得到快速发展，深水油气钻探及生产水深记录不断创新，全球钻井作业水深纪录已突破 3000m，截至 2013 年 3 月达到了 3165m，海底完井的水深纪录为 2934m，铺管水深纪录已达 2700m。全球海上原油产量占全球原油总产量的 35%，特别是深水油气产量增长迅速，成为重要的产量增长区。

(4) 科技进步成功推动了美国页岩气革命，引领了致密油风潮，掀起了全球范围内非常规油气资源开发热潮。

随着水平钻井、水平井多级压裂、微震监测、纳米孔隙 CT 成像数字岩心分析等技术进步与突破，工厂化钻井与作业模式的创新，美国页岩气等非常规气产量快速攀升。美国页岩气产量的突破，摆脱了天然气进口局面，美国页岩气产量从 2000 年的  $122 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$  增长到 2010 年的  $1378 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ，占到美国天然气总产量的 23%。页岩气开采技术被业界认为是过去 10 年里全球最重大的能源技术革新，由此正在引发全球包括中国、波兰、澳大利亚、阿根廷、捷克、南非、乌克兰、墨西哥等国在内的页岩气等非常规油气开发热潮。

继页岩气革命之后，技术创新使美国致密油得到规模化开发，在 Bakken, Eagle Ford 和 Barnett 页岩区带等地致密油产量迅速攀升。如 Bakken 地区（Bakken 主要是在美国境内，但是从盆地和地质构造上来讲，也扩展到加拿大境内），美国 Bakken 地层的产量从 2003 年的  $1 \times 10^4 \text{bbl}/\text{d}$  已经提高到 2010 年的  $45.8 \times 10^4 \text{bbl}/\text{d}$ ，达到半个大庆油田的水平，在加拿大境内的部分产量也已经超过  $10 \times 10^4 \text{bbl}/\text{d}$ 。在美国几乎每个星期都会出现新的致密油产区，目前至少已经找到 20 多个，另外在加拿大也有五六处已经找到致密油资源。

(5) 科技进步大幅度提高了作业效率。

科技创新和进步大幅度提高了工程技术服务领域的作业效率。例如，在钻井工程领域，钻机月速是反映钻井效率的重要指标。过去 10 年，随着技术的进步，全球钻机月速大幅提升。例如，2000—2010 年美国平均钻机月速（开钻至钻达总井深期间）从  $3928.30 \text{m}/(\text{台} \cdot \text{月})$  提高到  $4661.19 \text{m}/(\text{台} \cdot \text{月})$ 。预计未来 20 年全球平均钻机月速将维持增长趋势。

(6) 科技进步促进了石油工业与环境的和谐发展。

科学技术的进步带来了巨大的环境效益，使石油工业不断适应越来越严格的环保要求。例如在勘探开发领域，运用先进的勘探开发技术能够更加高效地开发油气资源，定向井、水

平井、大位移井、分支井、丛式井技术的发展使井场占地面积越来越少，地下控制面积越来越大，大大减少了环境污染。根据美国能源信息署(EIA)资料统计，从20世纪70年代到21世纪的头10年，平均井场占地面积从20acre下降到6acre，而地下油藏控制面积则从502acre扩大到32170acre。

CO<sub>2</sub>捕集—驱油—封存综合联产技术创造了环境与大幅度提高原油采收率的双赢效果。先进的产出水处理技术为页岩气、致密油的开发创造了良好的生态环境保障。先进的技术和完善的HSE管理体系，减少了污染物的排放，降低了环境污染，增强了工人作业的安全性。

## 第二节 10年来世界石油工业关键技术发展的特点与趋势

回顾世界石油工业关键技术发展历程，可以发现10年来世界石油科技创新呈现以下新的特点与趋势。

(1) 政府高度重视能源领域的科技创新，成为赢得未来发展优势，保障国家能源安全的关键。

① 国家高度重视科技创新战略研究，制定了各种能源技术发展战略、发展路线图和研发计划，并保持持续稳定的研发投入。

发达国家高度重视科技创新战略研究，制定了各种能源技术发展战略、规划了各种能源技术发展路线图和研发计划，开展了多个技术研发项目，实施了各种技术转让和推广计划。特别是油气领域的技术创新一直是各国政府支持的重点之一，推出多项研究计划。例如，美国国家石油委员会受美国能源部委托开展的《直面能源问题的严峻事实》战略研究，深入分析了未来(2030年)全球及美国的能源需求、供应格局、地缘政治以及技术现状与需求，提出了美国必须提高能源效率，扩大能源供应多元化，增强科技创新能力，加强碳管理，保障能源安全的总体战略。特别提出了2030年影响油气工业发展的关键技术。美国政府实施了超深水、非常规天然气和其他石油资源研究计划、提高采收率研究计划、深井和超深井研究等系列油气研究计划；日本政府制定了2030年和2100年能源战略技术路线图，实施了天然气水合物开发等计划；欧盟等国推出了可再生能源技术路线图；挪威实施了深水超深水计划(Demo, 2000)；巴西实施了深水超深水计划(PROCAP-3000)；韩国政府也制定了天然气水合物开发10年计划等。我国政府也制定了“中国至2050年能源科技发展路线图”，实施了油气重大科技专项等一系列研发计划。

② 政府层面开展的科技创新更具长远性、前瞻性、基础性和原创性。

各国政府支持的油气技术研发主要集中在3大方面：一是保障国家长期能源供应安全，提供多元化能源供应，提高能源效率；政府投入增长主要是在提高能源效率、可再生能源、核能、氢能和燃料电池等领域；二是为开辟风险更大、挑战更严峻的新区性领域超前布局与储备，如美国能源部针对致密气开发早在20世纪70年代初开展了“MHF”——大型水力压裂研究，80年代开展了“MWX”——多井试验研究，80年代后又实施了“IRD”——强化资源开发计划，针对煤层气、页岩气等非常规资源也相应制定实施了各种研究计划，制定了一系列优惠激励政策，有效引导了致密气、煤层气、页岩气等非常规油气资源的开发。近10年，为未来抢滩新领域，占领竞争优势地位，美国等政府纷纷开展了深水/超深水、非常规油气、极地、天然气水合物等研究计划；三是加强基础理论、应用基础和前沿技术研究，注重交叉

学科和高新技术领域的融合创新，提升原始创新和持续创新能力，加强共性的可推广技术（提高采收率、微井眼钻井、能源环境）研发。

（2）大石油公司高度重视科技创新，遵循“技术是生命线”的创新理念；大石油公司是技术创新的主体。

国际大石油公司都遵循“技术是生命线”的发展理念，瞄准全球资源和市场，始终坚持“技术创新支撑和引领油公司发展，提升核心竞争力”的科技创新战略，把科技创新战略作为支撑公司持续发展的核心战略之一，作为提高公司竞争实力和竞争优势的主要举措。如埃克森美孚提出“技术是我们的生命线”，壳牌公司坚持“技术创造卓越”的理念，英国石油公司认为“技术是我们业务发展的核心和支撑”，斯伦贝谢公司坚持“技术是勘探、开发生命线”的创新方略。

通过分析国际大石油公司的科技创新战略，可以总结出以下几大特点：

① 着眼全球，注重长远，正确把握战略布局与方向，形成“世界能源趋势—公司发展战略—科技创新战略”协调一致的战略体系。

无论是国际大石油公司还是国家石油公司，都对世界长远能源的供需格局和发展态势进行综合判断和预测，并以公司的效益与持续发展为核心，确立“未来世界能源发展趋势—公司业务发展战略—科技创新战略”协调一致的战略体系，强调科技发展战略与规划的前瞻性和长远性。

② 以公司的业务战略核心，制定科技发展战略，并形成科技“战略—规划—计划”体系。

目前，“业务驱动型”为大石油公司的科技发展战略典型特征。即根据公司的业务战略与目标确定技术需求和科技创新战略；在评估技术现状与能力的基础上，确定技术发展目标和策略，分类聚并形成研发项目；为保证研发目标的实现，构建研发体系，建立保障机制；从而形成目标明确、重点突出、指导性、可操作性强的科技发展战略—规划—计划体系。

③ 在具有战略意义的领域或环节上采取技术领先战略，充分发挥比较优势，加强具有自主知识产权的关键技术和专有技术发展，提高竞争实力。

各大油公司的技术水平和技术实力不尽相同，但是都在强调和强化优势领域的技术领先地位，将发展具有自主知识产权的关键技术和专有技术作为提升公司核心竞争力的重要手段，强调技术战略竞争价值的最大化。强调“做好你做得最好的”。

④ 在非优势领域技术发展采取快速跟进战略，强化集成，充分发挥技术的应用价值。

坚持有所为、有所不为的原则，在非优势领域快速跟进，采取多种形式的技术获取策略，不强调技术的原始创新或拥有权，而是强化集成应用和改进，强调技术应用价值的最大化。强调“把技术用得最好”。

⑤ 应用一代、研发一代、储备一代、构思一代成为大油公司技术发展的普遍做法。

国际大石油公司科技发展战略布局层次清晰、重点突出，注重长远发展。以持续改进技术支撑现有业务发展，以瓶颈技术突破保持竞争优势，以超前储备技术引领开拓未来业务发展。目前，各大石油公司将解决油气领域技术瓶颈、保持竞争优势的技术作为重点攻关技术，就油气领域的基础研究、新能源技术、温室气体减排等环境技术作为超前储备技术进行研发，为持续发展提供技术支撑。

⑥ 近年来，大石油公司科技创新组织管理呈现一些新的特点和趋势。

研发投入大幅增长，据里特公司统计，国际大石油公司研发投入年均增长 13%，部分

公司甚至达到 25%；研发机构布局更加贴近生产、贴近资源，如埃克森美孚公司和道达尔公司在卡塔尔、壳牌公司在马来西亚、BP 公司在阿拉斯加、道达尔公司和壳牌公司在加拿大油砂资源地设立研发/技术中心；注重合作研究，推动开放研究，大石油公司、技术服务公司通过与大学或研究机构等共同成立股份公司、建立合作联盟、工业界联合研发、技术并购等方式，充分利用外部技术力量，开展开放式研究，同时加强与政府研究机构的合作；国际油公司研发领域宽泛，与拥有油气资源的国家石油公司注重对特定技术研究开展研发的“Farmer”方式不同，国际油公司的研发领域更加宽泛，更加类似“Hunter”，寻求一切可能的技术与机会；研发、培训和技术服务一体化，埃克森美孚公司、壳牌公司、BP 公司和道达尔公司等均重视三者的协同管理与合作，通过研发、生产岗位轮换等方式加强人员培训工作。

(3) 科技创新方向明确，重点突出。

① 未来油气技术的研发重点。

无论是政府还是石油公司，未来油气技术的研发重点主要集中在 5 大领域：

- a. 提高未发现油气资源的发现率；
- b. 提高已发现资源的采收率；
- c. 提高资源转化率和利用效率；
- d. 发展替代能源，保障能源多样性；
- e. 碳管理等能源环境技术。

超前储备，长远布局则集中在以下 4 大领域：

- a. 非常规油气、超深水、极地、提高采收率等领域；
- b. 新能源与可再生能源；
- c. 提高能源效率；
- d. 碳管理等能源环境技术。

② 全球油气技术研发重点向深海和非常规油气等领域转移。

随着全球资源劣质化、环境复杂化挑战的日益严峻，深水、极地、非常规油气等新区、新领域成为越来越重要的战略资源接替区，也成为技术创新的重点和难点。从斯伦贝谢公司近年来研发投入领域的变化情况可以清晰地看到，研发重点向深海、非常规油气和 CO<sub>2</sub> 减排与利用等领域转移趋势明显。

(4) 油气技术发展趋势明显，进一步向集成化、信息化、智能化、可视化、实时化、绿色化方向发展。

① 向集成化方向发展。

面对环境恶劣化、油气目标复杂化和资源劣质化的挑战，任何单项技术都难以保证石油工业未来的持续发展，因此多学科技术集成是解决勘探开发重大问题的最佳途径，是当代石油科技发展的最明显的方向和趋势。集成化充分体现在：多学科集成、数据集成、技术集成、方法集成、工具集成以及资产运营过程等多层次集成。例如，油藏表征模型功能不断扩展，在一个正演模型中，集成越来越多的测量参数同时进行反演，从而更精细地进行油藏表征，从油藏描述的层次从 Description 到 Characterization 再到 Illumination，充分反映了集成的过程和作用。地震采集处理和解释一体化、地震与资源目标评价一体化、地震与电磁测量方法集成、压裂与微震监测、随钻测井(LWD)、随钻地层压力测试、纳米机器人油藏监测等一批关键技术将不断成熟与完善，集成共聚正在推动石油科技产生质的飞跃，大大提高了油

气资产的经营效益。

② 向信息化方向发展。

以高性能计算机、互联网络、卫星通信、数据银行等为主的信息技术应用，对石油工业的发展产生了巨大的推动作用，成为了石油工业发展的强大技术引擎。信息技术的应用纵向上贯穿石油工业整个产业链，如油气勘探、开发与生产、管道运输、炼油与加工、销售与市场各个环节，横向上贯穿整个管理、技术、决策和战略各个层次。信息技术应用与信息化建设为石油行业提供了广泛、共享的信息平台，推动了一代又一代关键技术的形成与发展，为集成和实时解决提供了基础，在此基础上石油工业可以实现远程生产监测与控制、远程分析与决策及实时解决与优化。目前，以信息技术为工具，连接人、战略、过程和信息，实时产生最优决策，提高业绩和价值的知识管理已经形成，并正在将石油工业推向相对完善的虚拟企业工作环境。

③ 向智能化方向发展。

以人工智能专家系统、地质导向、旋转闭环导向钻井系统、智能完井、数字油田、纳米机器人等为标志的一批关键技术不断发展与完善，推动了油气生产与经营向智能化方向发展。地质导向、旋转闭环导向钻井系统等大大提高了井眼轨迹的控制效率与精度；智能完井技术形成了数字油田的基础和核心。智能完井系统可以在不动井下设备的情况下，实现井下参数的实时连续监测、采集、处理、反馈及实时优化生产，地面遥控随意实现单井多层、多分支选择性生产和注入，优化各层的实时流动，实现随意封隔水气层，防止传流，一井多用，同采同注等智能控制功能。具有前视功能的导向系统、仿生井、纳米机器人等一批前沿技术正在引领油气技术向更高层次的智能化方向发展。

④ 向可视化方向发展。

20世纪90年代以来，可视化趋势日臻明显，地震成像技术、成像测井技术、钻井过程可视化监控及可视化研究中心等，为优化控制、多学科集成研究与决策提供了最佳途径。特别是虚拟现实技术的引进，许多国际大石油公司纷纷建成现代可视化中心，通过各种虚拟现实处理与分析工具，使地质资料、地震资料、测井资料解释、钻井资料、油藏模拟和生产动态资料等均能可视化，充分反应油藏客观现实，从而使多学科从传统的桌面系统协同，进入了沉浸式、可视化协同阶段，改变了石油公司决策与研究的工作方式和流程，明显提高了工作效率和准确性。

⑤ 向实时化方向发展。

通过智能完井、各种永久传感器、数据传输系统、生产控制系统等，目前石油工业可以围绕各生产环节——油田开发设计、钻井过程、油藏动态监测、生产优化及作业实施等环节，实现实时监测、实时数据采集、实时传输与处理和实时决策与解决的闭环流程；通过数字油田的建设与完善，从而将各种人力、工艺、技术、方法与工具等相互联系到一起，通过多学科集成协同工作，使整个油田管理如一个有机系统，在整个油田开发的生命周期内，完成E&P生产实时、连续的优化，形成包括全过程、全任务的实时优化闭环系统，达到最大的资产经营效益。实时化是科技发展主要目标和趋势。

⑥ 向绿色化方向发展。

创造能源与环境的和谐，打造绿色石油工业是21世纪石油科技发展的重要趋势。科技进步从能源结构上将保证能源从高碳量的石油向低碳的天然气和无碳的可再生能源发展，从

化石燃料向可再生能源发展，天然气正在成为这一过渡的桥梁。一批关键技术正在创造能源与环境的和谐发展，如水平井和多级压裂技术的突破，解放了非常规天然气资源，推进了能源结构的优化，CO<sub>2</sub>的捕集封存与提高采收率有望改变“游戏规则”，以丛式井、大位移井等为主的技术大大减少了井场污染面积，以清洁钻井液、完井液、压裂液等作业流体不仅保护了油气藏，同时也减少了环境污染。完善的 HSE 体系和清洁生产技术与工艺等推动世界石油工业朝着原料绿色化、生产过程绿色化、产品绿色化的绿色工业方向发展。

### ⑦ 高技术发展不断推动石油科技突破与创新。

不同时期“高新技术”皆对石油工业产生了巨大的推动作用。伴随着三次大的技术革命，世界石油产量出现了三次跨越式增长。随着信息技术、纳米技术、生物技术、新材料技术等现代高技术的发展，石油工业从 I1 向 I4 (Instrument×Information×Intervention×Innovation) 时代跨越。纳米技术、新材料技术在石油行业呈现良好的应用前景，纳米机器人在油藏漫步已经梦想成真，纳米驱油、生物驱油、纳米添加剂等正在油气生产中得到广泛研究和探索，专家预言，最有可能引起变革的是提高传感器的灵敏度、改良各种钻井材料，增强计算机运算处理和运算能力，制造出各种功能性的智能材料或剂。

## 第三节 未来 20 年世界石油工业技术发展展望

在对过去 10 世界石油工业技术发展进行了回顾的基础上，从公司、油气资源和专业领域角度对未来 20 年技术发展进行了展望。

### 一、不同油气资源未来 20 年技术发展展望

未来 20 年，在继续发展常规油气开采技术的同时，将重点发展非常规油气、深水超深水和极地油气资源的勘探开发技术。非常规油气、深水超深水和极地油气资源将成为重要的战略资源接替区，是未来争夺的焦点，也是科技创新的热点和难点。

#### 1. 常规油气开采技术

对于剩余常规石油资源，提高采收率是关键，且潜力巨大。美国十分重视 EOR 技术研发，目前应用最成功的是二氧化碳混相驱和蒸汽热采技术。近年来，在美国能源部的资助下，美国国际先进资源公司 (ARI) 提出了“新一代”CO<sub>2</sub>-EOR 技术，即在现有技术基础上：(1)改进井型设计，充分扩大井与油藏的接触面积；(2)改善流度比、提高混相能力；(3)加大 CO<sub>2</sub> 注入量；(4)实时过程监控、信息反馈与动态优化。模拟评估认为推广此技术有望将原油采收率从目前的 33% 提高到 60% 以上。

通过对资源和技术评价与调查，美国国家石油委员会认为的影响未来常规石油生产的关键技术及其工业化时间表见表 1-1。

表 1-1 影响未来常规石油开采的关键技术

技术	简评
大幅度增加井与油藏的可控接触面积技术	随着技术进步，水平井的战略地位和数量将不断提升，通过水平井技术可以更多、更有效地开发各种石油储量
水平井/多分支井/鱼骨井	从一个主井眼钻多个分支井眼可以进一步扩大与油藏的接触，有效开采剩余油

续表

技 术	简 评
关节内窥镜建井技术(Arthroscopic-well construction)	在油藏中任何含油的地方, 部署和钻泄油井眼(类似人体血管系统), 从而提高最终采收率
SWEEP 系列技术(See, Access, Move)(看得见、进得去、采得出)	这是一系列集成技术(包括下面紧邻的4项技术), 通过这些技术, 可以清楚地观察到油藏内部状况、准确进入/接触到剩余油, 并有效地将其驱替出来, 从而大幅度提高可采储量
智能井(注入与生产)	可控制不同的流体按需求流向不同的地方(在井筒中)
油藏表征与模拟	现有模型功能不断扩展, 在一个正演模型中, 包括所有的测量参数同时反演
油藏实时可视与管理	油藏规模的测量参数(压力、地震、电磁、重力)联合反演, 可能带有不确定性, 但无数据丢失
全系统的任务控制	全系统(地下与地面)计算机再现与控制, 真正实现系统运行最优化
二氧化碳驱流度控制	CO <sub>2</sub> 驱替前缘的监测和控制是项目成功的重要因素
蒸汽辅助重力驱(SAGD)/蒸汽与三元复合驱(ASP)技术	改进和优化 SAGD(包括运用 ASP)的系列技术对广泛、经济地开发重油十分关键
北极地区海底至海岸(subsea-to-beach)工艺技术	海床表面的冰冲蚀, 对于传统的水下作业工艺和传统的海底井口到海岸的作业工艺来说是一个巨大的挑战
人工举升	仅将需要的流体举升到地面
更快捷、更廉价和高精确度的三维地震技术	更快、更好、更便宜会使这项技术得到更广泛的应用

## 2. 非常规油气资源

### 1) 致密气、煤层气、页岩气、致密油

非常规天然气资源主要包括致密砂岩气、煤层气和页岩气等, 在全球分布广泛。表 1-2 和表 1-3 分别是未来 10 年和 2030 年非常规天然气重点研发技术。致密油的开采技术与页岩气是基本一致的。

表 1-2 未来 10 年非常规天然气重点研发技术

技 术	简 评
实时随钻甜点监测	通过导向技术, 引导钻头沿油气藏的高产能区域钻进
井深小于 1524m 的连续油管钻井	充分发挥连续油管钻井的优势(钻进速度快、井场占地少、钻机便于移动), 实现一些困难地区的钻井
页岩气藏层状结构和天然裂缝 3D 地震成像	如果通过更好的测试方法, 能更好地认识了解气藏, 就可以进一步提高现有气井的采收率
产出水处理	采出水经处理后, 可变废为宝, 再用来进行农业灌溉, 满足工业或钻井过程的各种用水需求
深井钻井	深井钻井技术的发展决定了能够开发多深的煤层气、页岩气和其他各类非常规气藏
CO <sub>2</sub> 注入/封存提高煤层气产量	需要确定技术解决方案, 筛选合适的埋存地层及 CO <sub>2</sub> 源
数据处理和数据库	目前已建成了包括北美大部分盆地地质、工程参数的数据库, 正在逐步建立涵盖全球各盆地的数据库

表 1-3 2030 年非常规天然气重点研发技术

技 术	简 评
天然气资源评价和地质储量评估	开展全球各盆地非常规天然气资源评估并建库, 供全球相关者使用
钻井和完井	不断改进钻井系统, 依靠先进的金治和材料技术、研发更精准的实时井下传感器, 保证钻遇“甜点”

注: “渐进”——正常进度; “加速”——加大资金投入(3~5 倍); “突破”——大幅度增加资金投入(10~100 倍)。

### 2) 重油、超重油和沥青

由于大量的重油资源已被发现, 所以, 目前勘探技术的重要性相对降低, 重点是开发技术的改进。其开发技术主要包括浅层露天矿采、注蒸汽热采、冷采(出砂冷采、水平井冷采等)、火烧油层(尚存在技术经济等问题)等方法。提升重油价值、降低成本、减小环境影响是未来重油技术的发展重点和方向。表 1-4 是现有重油开发技术和未来重点研发技术。

表 1-4 未来重点研发技术

方 法	技术描述	优 点
替代燃料和气化、碳捕集与封存一体化	用煤、焦炭或渣油提供能量和制氢	降低 CO <sub>2</sub> 排放
满足特需的小型核电厂	建小型核电厂, 提供能量和制氢	降低 CO <sub>2</sub> 排放, 但要考虑安全、扩散、核废料处理等问题
就地改质	在使用或不使用催化剂的情况下, 利用热能就地改质	临界能量平衡
井下蒸汽发生技术	利用电能或燃料在井下产生热能或蒸汽	适用于北极、海上或深层
矿采+井采		适用于北极和地面井场环境有严格限制的地区

### 3) 油页岩

油页岩由基岩和干酪根组成。干酪根可以转化成为比重油和煤更优质的液态燃料。全球油页岩资源约  $3 \times 10^{12}$  bbl, 与常规原油资源量相当, 约一半以上发现于美国。

最常用的开采方式是露天采矿与地面干馏。目前正在研发的就地转化技术引起了业界的广泛关注。这种方法通过钻井, 缓慢加热油页岩储层至 350℃ 左右, 数月后干酪根逐渐转化成石油和天然气。壳牌公司已经开展了先导性试验, 采出了优质的中间馏分原料油。就地转化技术刚刚兴起, 未来数十年会有哪些技术突破尚不清晰, 但热量的有效利用和管理、油藏温度和饱和度分布预测、反应区“冻结壁”或低渗透屏障的监控技术等都是非常重要的技术。

油页岩开发技术与商业化时间:

2020 年——环境修复与治理; 地面干馏装置与工艺改进; 就地转化先导试验;

2030 年——大规模开发。

### 4) 天然气水合物

天然气水合物主要分布于北极地区的冻土层内、大陆坡、海底、湖底等地。极地和海洋环境中的水合物在储层构造、技术需求和最终经济价值等方面都有很大不同。

目前, 世界范围内只钻了几十口探井, 主要在日本周边海域和印度海域, 但相关资料尚未全部公开, 勘探评估效果还不确定。



天然气水合物技术及商业化时间展望：

2020 年——北极地区水合物商业化开采；勘探与评价美国海域水合物资源；

2030 年——开发出海洋天然气水合物开采方法。

### 3. 深水超深水油气资源

深水油气资源是一种存在于非常规环境中的常规资源，在勘探、开发和生产过程中面临着一系列的技术挑战。未来 20 年优先发展的深水技术见表 1-5。

表 1-5 优先发展的深水技术

技 术	重要性	简 评
油藏表征	最大限度提高采收率	只能用很少(但很贵)的油井资料，对越来越复杂的油藏进行动态预测和监测
生产系统扩充	保障油气资源经济有效开发	与陆上生气生产系统相比，要实现远程资源的高效开发，海上生产系统要有很多扩展，例如：必须建立海底流动保障系统(开采与输送至地面)、井控、配电及数据通信等系统
高温高压完井系统	保障安全、可靠的开发生产	各种设备与材料必须要在超高温、超高压、强腐蚀的环境中可靠而稳定的工作
海洋气象预报和系统分析	保障安全、可靠的开发生产	必须要有各种预测大气、水下“天气”及工程系统响应的综合模型

在上述 4 个优先发展的技术领域，高温高压完井系统、海洋气象预报和系统分析必须依靠政府与行业间的通力合作，开展跨行业的技术转让或联合研发。实际上，深水技术与其他领域的技术是紧密相关的，必须给予高度重视(表 1-6)。

表 1-6 深水开发重要相关技术

技 术	重要性	简 评
盐下成像	寻找新的大型油气资源	用地震处理新技术，实现复杂盐下精确成像
气体液化	解决天然气的远程输送	鉴于离岸距离和水深双重因素，能够将天然气转换成易输送形式的技术会越来越有价值

### 4. 北极油气资源

近年来，北极地区受到全球瞩目，据 2008 年美国地质调查局(USGS)公布油气资源调查报告显示，在北极圈以北地区 25 个最具油气潜力的地质区，拥有  $900 \times 10^8$  bbl 待发现的技术可采石油、 $1670 \times 10^{12}$  ft<sup>3</sup> 待发现的技术可采天然气和  $440 \times 10^8$  bbl 技术可采天然气液，分别占世界待发现石油、天然气和天然气液的 13%、30% 和 20%。许多大国和大石油公司纷纷加快装备建设，加紧队伍组建，抢滩北极地区油气勘探开发，将北极确立为“首要战略能源基地”。例如，俄罗斯首先加快了核动力破冰船队的建设与维护，制定了《2020 年前俄罗斯联邦北极地区国家政策原则和远景规划》，美国发布新的北极政策。荷兰皇家壳牌公司、英国石油公司、埃克森美孚公司等国际大石油公司针对北极严冰、极低温、冬日漫长黑夜等极端恶劣的自然条件，加强技术装备研发与储备，如壳牌公司建造安装的极地冰上钻井平台，快速移动钻机、极低温原油输送等技术，借此进入该地区开展油气勘探与开发。为满足未来对勘探开发北极丰富的油气资源的需要，未来将设计建造多种类型的北极油气勘探开发装置。