

未来 10 年极具发展潜力的 20 项油气勘探开发新技术

杨金华 李晓光 孙乃达 张焕芝 邱茂鑫 焦姣
侯亮 张珈铭 郭晓霞 刘知鑫

(中国石油集团经济技术研究院石油科技研究所)

摘要: 为增储上产和降本增效,未来油气勘探开发领域在向智能化方向迈进的同时,将陆续推出或应用一些新技术、新装备、新材料。跟踪分析世界石油科技最近进展,筛选出 20 项在未来 10 年极具发展潜力的油气勘探开发新技术,具体包括:智慧地质、勘探开发一体化智能化协同平台、智能油田、纳米智能驱油技术、井下油水分离技术、地下原位改质技术、高精度智能压裂、智能化海底工厂、浮式 LNG 装置、海域天然气水合物安全高效低成本开发技术、压缩感知地震勘探技术、人工智能地震解释技术、弹性波成像技术、随钻前探与随钻远探技术、光纤测井技术、“一趟测”测井技术、耐超高温井下仪器及工具、智能钻井、连续运动智能钻机、双壁管反循环钻井。

关键词: 油气勘探开发; 提高采收率; 前沿技术; 自动化; 数字化; 智能化

DOI: 10.3969/j.issn.1002-302x.2019.01.007

中图分类号: TE1; TE2; TE3; F416.22 文献标识码: A

Twenty Items of New Technology for Oil and Gas Exploration and Development in Next Decade

Yang Jinhua, Li Xiaoguang, Sun Naida, Zhang Huanzhi, Qiu Maoxin, Jiao Jiao, Hou Liang,
Zhang Jiaming, Guo Xiaoxia, Liu Zhixin

(Petroleum Technology Research Branch, CNPC Economics & Technology Research Institute,
Beijing 100724, China)

Abstract: A series of new technology, new equipment and new materials will be developed and applied to increase reserves and production and reduce oil and gas production cost for cost-effectiveness in the future, with oil and gas exploration and development becoming intellectualized. This paper follows up and analyzes the latest developments of global petroleum technology and selects 20 items of new technology for oil and gas exploration and development in the next decade, which have a great potential for development. They can be used for reference for the industrial insiders. These 20 items of technology include smart geology, integrated intelligent platform of exploration and development, intelligent oilfield, nano intelligent oil flooding technology, downhole oil-water separation technology, underground in-situ upgrading technology, high-precision intelligent fracturing, intelligent subsea factory, FLNG unit, safe and efficient cost-effective development technology for

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题“陆上油气勘探技术发展战略研究”(编号: 2017ZX05001-005)。

第一作者简介: 杨金华, 1963年生, 1984年本科毕业于西南石油大学钻井工程专业, 高级工程师, 长期从事钻井技术调研与发展战略研究工作。E-mail: yangjh@cnpc.com.cn

收稿日期: 2018-11-19

offshore gas hydrates, compression-sensing seismic exploration technology, AI seismic interpretation technology, elastic wave imaging technology, look ahead and deep directional resistivity logging while drilling, fiber optic logging technology, one-trip logging, downhole instruments and tools for ultra-high temperature, intelligent drilling, continuous motion intelligent drilling rig, and reverse circulation drilling with pipe in pipe.

Key words: oil and gas exploration and development, enhanced oil recovery, cutting-edge technology, automation, digitalization, intelligentization

中国石油集团经济技术研究院石油科技研究所长期从事世界石油科技跟踪分析及我国石油科技发展战略研究。为推动我国油气勘探开发技术的发展，研究团队从众多的候选技术中筛选出20项极具发展潜力的新技术，现分述如下，以供业内参考。

1 智慧地质

大数据、云计算、物联网等信息技术与地质勘探融合发展，不断提升地质勘探的数字化水平，“地质云”平台的建立就是发展进程中的一个重要里程碑。借助“地质云”平台，可实现地质调查信息高效共享和精

准服务、地质调查管理业务一体化和协同化、国内外地学科研信息交流与多方协同。

展望未来，人工智能与地质研究的深度融合，将催生出智慧地质，实现由地质大数据向智慧地质的升级。智慧地质涉及地球各圈层，包括地球形成与演化历史，地球物质组成及其变化，矿产资源形成、勘查与开发利用，人类环境的破坏、修复和保护等。智慧地质可为矿物勘查提供可视化线索，开创矿物学的全新方向。智慧地质在油气行业应用中，将有助于更高效地圈定最具潜力的区域、储层和井位，提高探井成功率，促进增储上产（图1）。

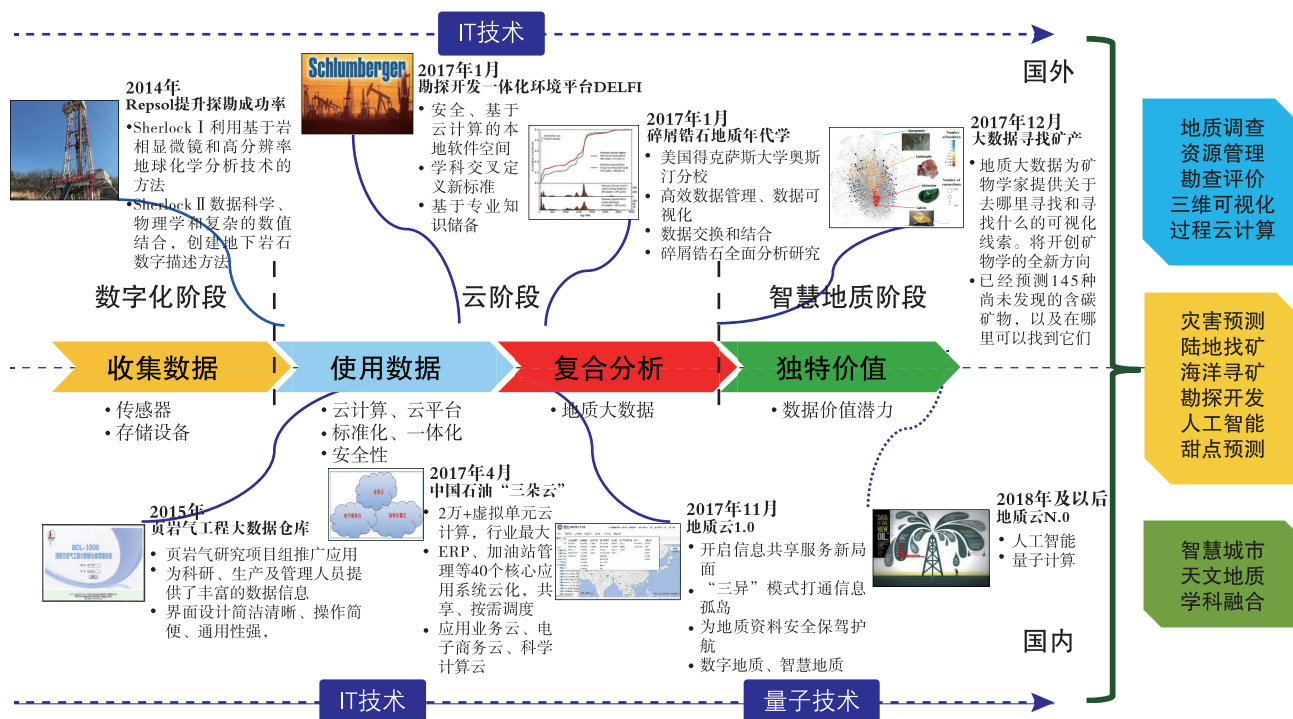


图1 地质勘探数字化、智能化发展历程

2 勘探开发一体化智能化协同平台

多学科协作是油气行业发展大趋势，相关平台建设一直是大型油公司和油服公司的战略竞争制高点。随着大数据、云计算、物联网等信息技术的发展，国际油公

司和油服公司相继推出多学科一体化协同平台（环境），如斯伦贝谢公司的 DELFI 平台、贝克休斯 GE 公司的 Predix 平台等。DELFI 平台是一个基于云计算的协同平台，可实现多学科交互融合和勘探开发一体化，包括地

质—油藏—工程一体化，从根本上改变勘探开发工作模式，从而提高工作效率，实现综合效益最大化。

随着人工智能的快速发展，未来将打造“勘探开发一体化智能化协同平台”，通过提供信息共享、技术创新、生产经营一体化、智能化协同平台或环境^[1](图

2)，大幅度提升勘探开发数字化、网络化、智能化、一体化水平，促使复杂的计算过程（如建立模型、数值模拟、数据分析和预测等）、更加顺畅、智能、高效，加强信息共享、多学科协作，开启勘探开发一体化、智能化新篇章。

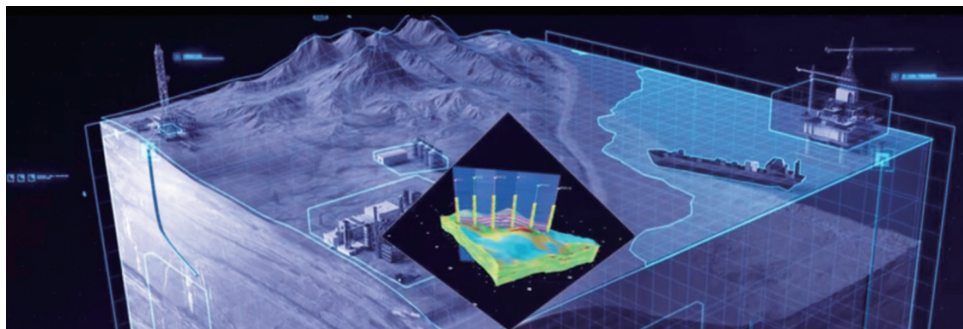


图2 勘探开发一体化智能化协同平台示意图

3 智能油田

数字油田经过 20 多年的发展，油气田开发已初步实现了数字化、网络化、自动化，并开始向着智能化目标迈进。从最初的油田历史数据归档管理以及生产、管理、经验数据的实时采集及存储；到集成油田员工、油井、设备等信息，实现互通互联、统一管理；再到生产数据的自动采集、传输和储存，油井与设备的远程控制、自动优化，自动报警、自动关停；最终实现利用已有的大量知识及经验对油田进行智能化开发的目的。相应地，数字油田技术的应用范围也逐渐从井筒、油井扩展到油气藏、油气田，并将最终实现全资产覆盖。

智能油田是数字油田未来的发展方向，将以一个统一的数据智能分析控制平台为中心，无论固定资产、移动设备还是工作人员，都将成为数据的收集者和接受者，并直接同控制中心建立联系。智能控制中心结合人工智能、大数据、云计算等技术，通过分析海量数据，在全资产范围内实时完成资源合理调配、生产优化运行、故障判断、风险预警等，最终实现全部油田资产的智能化开发运营（图3）。

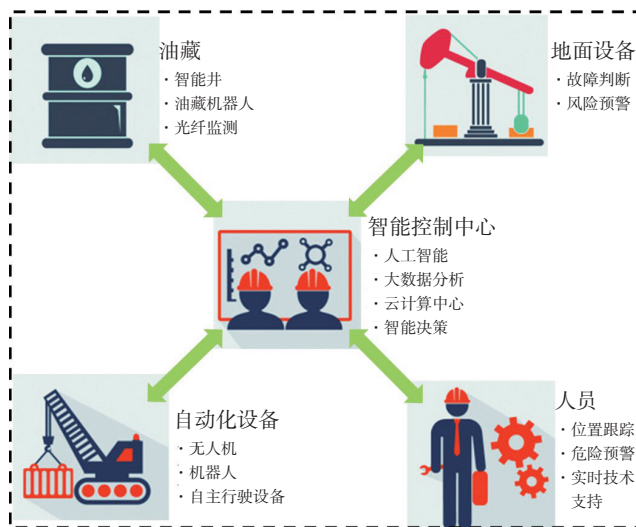


图3 智能油田资产管理

4 纳米智能驱油技术

纳米技术与提高采收率技术（EOR）融合集成，可解决传统 EOR 技术不能解决或难以解决的问题，如波及效率低、费用昂贵、苛刻环境适应性差及存在潜

在储层伤害等。纳米智能驱油技术的研发思路是：纳米驱油剂的“尺寸足够小”，能够基本实现全油藏波及；“强憎水强亲油”，遇水排斥，遇油亲合，具有自驱动力，实现智能找油；“分散油聚并”，能够捕集分散油，形成油墙或富油带并被驱出。纳米智能驱油技术有望成为提高采收率的战略接替技术，预期将大幅度提高最终采收率，应用前景广阔。未来油田开发将以纳米材料为基础，以化学改性为手段，在同一纳米材料上集成多种功能，真正赋予纳米材料目标性与智能性，将“一剂多能”“一剂多用”变为现实（图4）。

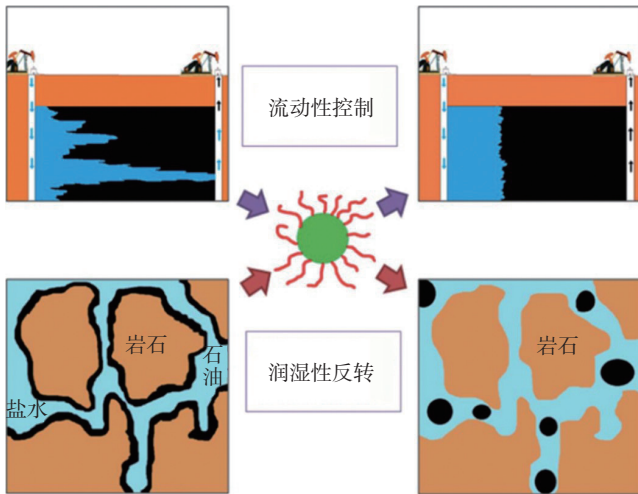


图4 纳米智能驱油技术

5 井下油水分离技术

高含水是成熟油田面临的重大挑战之一，高含水油井开采过程中产液量高、含水率高，产液量与产油量成正比。为了增加产油量，一般采取大泵抽汲开采方式，该方式油水日处理量巨大，导致开采成本上升，而污水处理也会带来潜在的环境问题。井下油水分离技术将油水混合物在井下直接分离，石油、天然气和剩余水被开采出地面，地面产出液大幅降低，含水率大幅下降，可极大缓解地面处理站油水处理压力，降低潜在的环境风险，是实现高含水油田经济稳定开发的有效措施之一（图5）。目前该技术正朝着结构小型化、功能集约化、管理智能化的方向发展，未来将开辟“井下工厂”开发新模式。

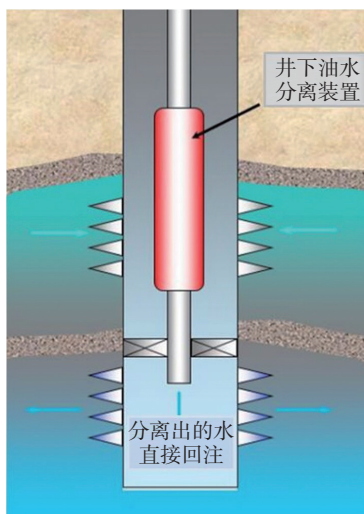


图5 井下油水分离技术示意图

6 地下原位改质技术

地下原位改质是通过将地下储层进行高温加热，将固体干酪根转换为轻质液态烃，再通过传统工艺将液态烃从地下开采出来的方法。该技术具有不受地质条件限制、地下转化轻质油、高采出程度、低污染等优点，一旦规模化应用，将对重质油、页岩油和油页岩开采具有革命性意义。

壳牌公司地下原位改质技术采用小间距井下电加热器，循序均匀地将地层加热到转化温度（图6）。该技术通过缓慢加热提升产出油气的质量，相对于其他工艺可以回收埋藏极深的岩层中的页岩油，同时省去地下燃烧过程，减少地表污染，降低对环境的危害。为了避免地下水污染，壳牌公司开发了独有的冷冻墙技术，可有效避免生产区域在页岩加热、油气采出和后期清理过程中地下水的侵入。对于一个商业开采项目，根据加热器间距和加热速度，将地层加热到转化温度的时间估计需要2~4年。试验结果显示，电加热原位改质工艺所生产油气的能量值是所消耗能量的3倍。

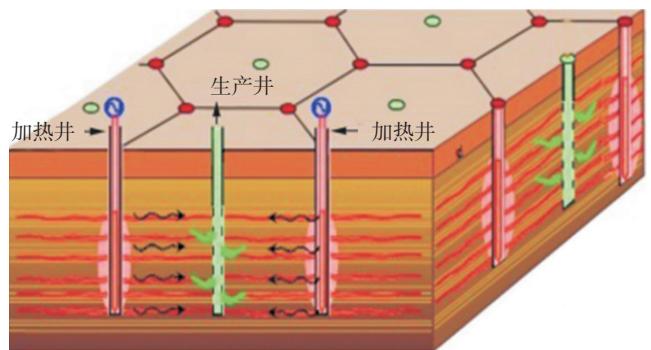


图6 地下原位改质技术示意图

7 高精度智能压裂

近年来，水平井分段压裂呈现压裂段数越来越多、支撑剂和压裂液用量越来越大的趋势。从长远看，实现压裂段数少、精、准，才是水力压裂技术的理想目标。目前业界正在探索大数据、人工智能指导下的高精度压裂技术和布缝优化技术，但是真正能够“闻着气味”走的压裂技术还有待研究和突破。美国Quantico能源公司利用人工智能技术，将静态模型与地球物理解释紧密耦合，对不良数据进行质量控制，形成高精度预测模型，用于压裂设计，在二叠盆地和巴肯油田的100

多口油井中使用后，与邻井对比结果表明，优化后的完井方案不仅可以使产量提高 10% ~ 40%，还能有效降低整体压裂作业成本（图 7）。

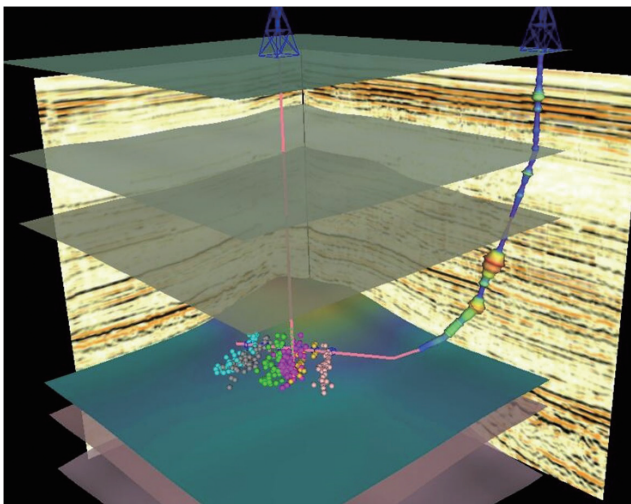


图 7 高精度智能压裂示意图

随着“甜点”识别、压裂监测技术和人工智能技术的发展，未来的高精度智能压裂技术有望实现每一级压裂都压在油气“甜点”上，可有效提高储层钻遇率和油气产量，降低开发成本，降本增效意义重大。

8 智能化海底工厂

为应对风、浪、流等恶劣海洋环境对海上油气生产的影响，海上油气生产尤其是深水油气生产日益海底化。海底生产系统已得到规模应用，并呈现以下发展特点。

(1) 功能及处理能力不断增加：主要包括水下分离、水下举升、水下多相流计量、水下干湿气压缩、产出水回注等。

(2) 适应水深不断增加：海底采油树的最大安装水深纪录已达 2934m。

(3) 自动化水平不断提升。为进一步提升海底生产系统的自动化水平，国外已有公司在深水油气开发中应用了全电动海底生产系统，进一步削减深水油气开发支出，预示海底生产系统将迎来全电动化时代。

随着技术的不断进步，未来将发展海底生产系统的升级版——海底工厂（图 8）。集油气水三相分离技术、水下增压技术、处理后的原油存储海底、产出水处理后进行回注于一体的海底油气生产及处理厂，可

大幅减少海面油气生产设施投入，甚至最终可实现全海底化生产。

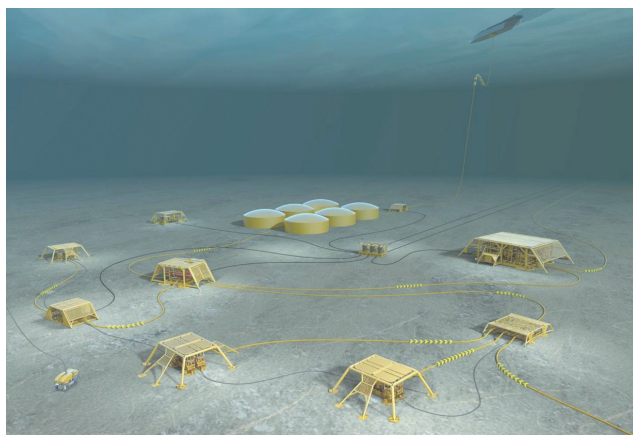


图 8 海底工厂

人工智能快速发展，海底生产系统和海底工厂也将向着智能化方向发展，催生智能化海底生产系统和智能化海底工厂。

9 浮式 LNG 装置（FLNG）

当前主流的浮式生产装置包括浮式生产储油卸油装置（FPSO）、半潜式平台（Semi）、张力腿平台（TLP）和 Spar（深吃水立柱式平台）四大类。其中，FPSO 应用最为广泛，2018 年全球大约有 180 艘 FPSO 在役。经过数十年的发展，FPSO 相关技术已经成熟，并持续升级换代，TLP 平台已发展到第 3 代，Spar 平台已发展到第 4 代。这些浮式生产装置适合的油气生产模式是：海底生产系统 + 浮式生产装置 + 油气管道（或穿梭油轮）。

在缺乏海底管道设施的海域，国外正大力发展浮式 LNG 装置（FLNG）。该装置集天然气生产、处理、液化、储存、卸载功能于一体，开创了全新的海上天然气开采方式。目前全球已有两艘浮式 LNG 装置投入使用（图 9），其中一艘 FLNG 装置位于马来西亚沙捞越海上；另一艘位于澳大利亚 Browse 盆地，离岸 200km，实际作业水深 250m，长度为 488m，宽度为 74m，年生产能力为 LNG 360×10^4 t、LPG 40×10^4 t，储存能力为 43.75×10^4 m³。伴随越来越多的 FLNG 装置投入运营，将推动海上边际气田、远海气田和深水气田的高效开发。



图9 已投用的两艘浮式LNG装置

10 海域天然气水合物安全高效低成本开发技术

全球海域天然气水合物资源量巨大，经过长期的技术研发，中国、日本等国已成功试采，未来10年将越来越多的国家进行试采^[2]（图10）。中国、美国、日本、印度、加拿大、德国、法国、英国等30多个国家都在大力开展技术攻关，以期早日实现天然气水合物的商业开采。目前商业开采海域天然气水合物面临的最大的挑战一是成本问题，二是安全环保问题。为解决这些问题，需要应用一系列颠覆性技术装备。浅表层天然气水合物将主要应用铰吸法进行开采，埋藏较深的天然气水合物将应用钻井法进行开采。

天然气水合物开采井在海底以下深度不会超过1000m，如应用大型浮式钻井装置（钻井船或半潜式钻井平台）及大型钻机，实属大材小用，极不经济。因此，为了降低钻井成本，必须应用成套的安全高效低成本技术装备，如定制中小型浮式平台、中小型海底防喷



图10 天然气水合物试采

器、复合连续管钻机、连续管钻井、复合材料隔水管等，甚至实施无隔水管钻井^[3]。当天然气水合物实现商业开采，将开启一个崭新的时代——天然气水合物时代，届时天然气水合物将成为重要的接替资源。

11 压缩感知地震勘探技术

油气勘探目标日益复杂化，对地震数据精细化要求不断增加。高密度地震数据采集可满足地震信号的采样需求，但生产成本过高。基于压缩感知理论的地震数据高效采集方法，突破了奈奎斯特采样定理的限制，是地震采集实现降本增效的重要方法，将推动同步震源混采技术快速发展，同时带动相应的数据处理、成像技术的发展^[4-5]。

陆上、海上同步震源混合采集快速发展，为地震采集降本增效奠定了基础，BP、斯伦贝谢、中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司在同步震源混合采集方面取得了重大技术进展。康菲公司在压缩感知地震采集、处理和成像方面进行了多项研究，开发出一套关键

的集成技术系列，即压缩地震成像（CSI）技术，其中主要包括非规则优化采样（NUOS）技术、混源采集技术、数据重建技术等，并完成商业应用。应用结果证明，CSI技术在满足处理、成像、AVO分析的基础上，大大提高了采集效率，缩短了施工周期。在阿拉斯加陆上可控震源地震勘探项目中，利用NUOS采样方法，克服了季节、环境的限制，采集效率大幅提高，经过数据重建与数据处理，获得了高分辨率图像（图11）。

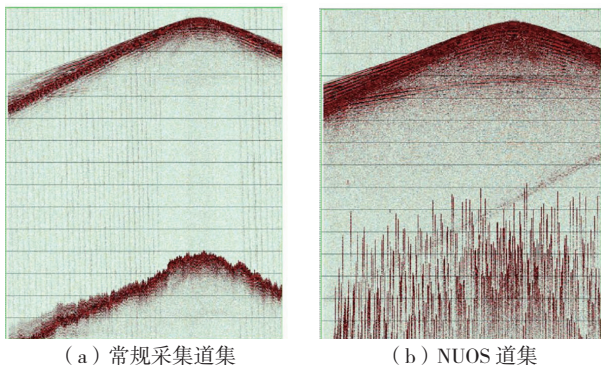


图 11 NUOS 道集与常规采集道集对比

12 人工智能地震解释技术

地震解释的速度和精度对勘探工作至关重要。传统的地震解释方法越来越难以应对海量的地震勘探数据。为此，国外已经有公司开始将机器学习应用于地震解释。例如，Geophysical Insights 公司利用机器学习与大数据分析技术进行地震属性分析，应用于薄层解释、直接烃类指示（DHI）等方面，减少地震解释的不确定性，推动定量解释的发展。

2017 年，帕拉代姆公司开始了基于机器学习的地震解释技术的应用，应用多层神经网络进行岩相预测。公司开发了用于岩相分类的机器学习算法，嵌入 SeisEarth 解释平台，通过概率方法得到岩相数据体，以此描述岩相类型和分布。该方法运行速度快，所需人力少，能够在量化不确定性分析时减少猜测，提供更加稳定的油藏描述结果。应用岩相分类的机器学习算法对美国二叠盆地地层数据进行分析，获得了由各类岩性组成的 3D 地质体（图 12）。

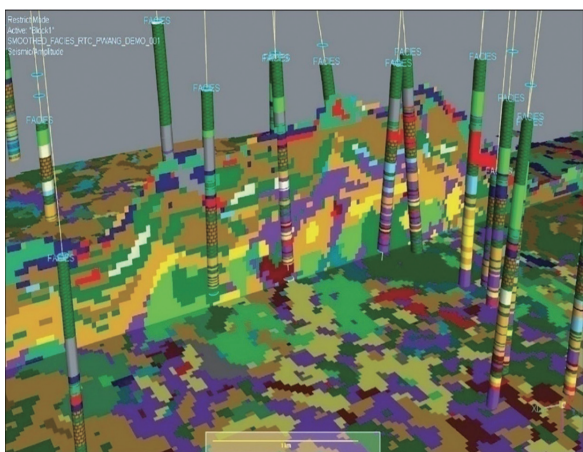


图 12 基于机器学习的二叠盆地储层预测结果展示

基于深度学习等人工智能技术的地震解释，充分利用海量数据，通过大数据分析，可大幅缩短模型处理时间，改善地震道属性实时计算及复杂地区盆地视觉分析，达到获得更精确的地下信息、提高钻探成功率的目的^[6]。

13 弹性波成像技术

使用弹性波方程延拓后得到的多分量波场包含纵波和横波信息。弹性波成像技术作为基于弹性波理论的地震勘探技术的重要分支，研发矢量信号处理、矢量噪声压制、纵横波联合初始速度建模等关键技术，改进弹性波全波形反演及成像效果，为储层预测提供更加翔实的资料，是近些年地球物理领域研究重点（图 13）。弹性波成像技术可以分为两类：一类以标量波场理论为基础；另一类以矢量波场理论为基础，矢量输入、输出，可以更好地保证地震资料的原始信息。弹性波成像技术目前仍处于理论研究阶段，弹性波逆时偏移等研究近几年不断深入。实现九分量地震资料处理能力是今后研究重点，以三维弹性波正演为突破口，与高性能计算技术深度结合，可以大幅提升弹性波全波形反演和成像的效率与精度。

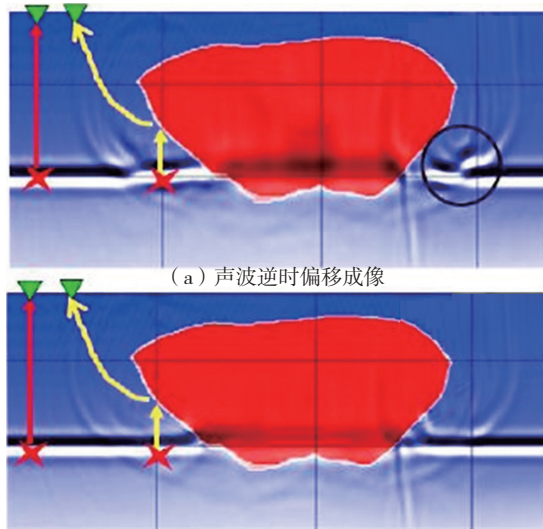
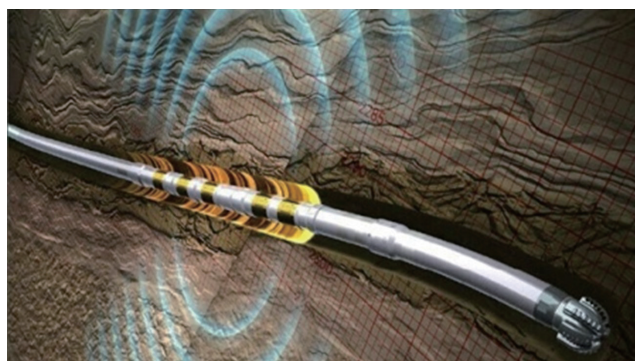


图 13 弹性波成像

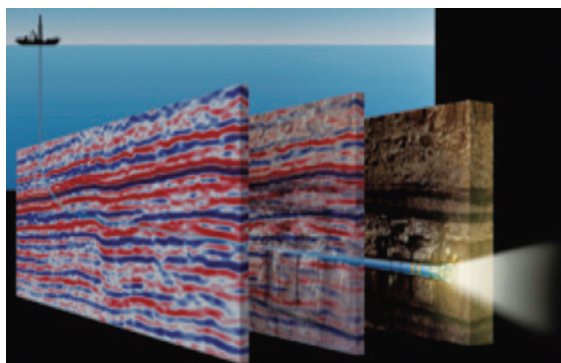
14 随钻前探与随钻远探技术

随钻前探技术主要包括随地震前探技术和随钻方位电磁波前探技术两类。2016 年斯伦贝谢公司推出的 EMLA 样机前探距离达到 30m。

随钻远探技术可以探测井筒周围数十米距离内的流体、油藏边界，具有随钻油藏描绘、地质导向功能。2015年斯伦贝谢公司推出 GeoSphere 服务，探测深度达 30m，与包括 SpectraSphere 井下流体分析服务在内的整套随钻测井技术以及地表测井技术结合使用，可产生真实反映油藏结构与流体的测绘图，有利于优化井位，最大化油藏接触，改善油田开发方案。2018年哈里伯顿公司推出的 EarthStar 服务，将探测距离提高到 61m（图 14）。



(a) 随钻远探



(b) 随钻前探

图 14 随钻远探和随钻前探

随钻前探与随钻远探技术有利于随钻油藏描述和随钻地质导向，及时识别前方“甜点”及储层边界，及时调整井眼轨迹和钻井工程参数，更好地引导钻头钻达“甜点”，提高储层钻遇率和单井产量，降低吨油成本^[7]。展望未来，随钻前探与随钻远探技术将会探测得更多、更准、更远、更快，在随钻油藏描述和随钻地质导向方面发挥更大的作用，并成为智能钻井、智能油田的重要组成部分。

15 光纤测井技术

光纤材料具有抗电磁干扰、抗环境噪声、电气绝

缘性及自身安全性强等特点，广泛应用于井下恶劣环境中的储层参数测量。用于油气井监测的光纤传感技术主要有分布式温度传感器、分布式应力传感器和分布式声波传感器。这些技术研究发展阶段存在差异，其中，分布式温度传感器最成熟，已经有近 20 年的井下应用历史；除分布式温度传感器，单点光纤温度和压力测量已经商业化应用；分布式压力传感器还处于开发阶段^[8]。未来的油气井检测将会因光纤技术进步发生重大改变：在井的全生产周期内沿井筒进行连续测量，实现永久性监测；即使在恶劣环境下，也可以提供全面的井下生产数据；在不影响油气生产的前提下，探测气、水突破，识别套后窜流，探测泄漏，检测各种管柱及完井设备的完整性（图 15）。光纤技术的应用有利于促进智能完井、数字油田的发展。

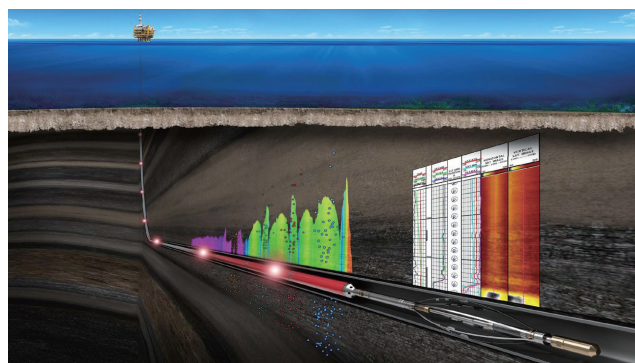


图 15 光纤测井技术

16 “一趟测”测井技术

为了减少占用井场时间和简化作业流程，目前测井作业已基本实现一串测，但仍无法满足现实需求，以随钻测井代替裸眼井测井已成为测井行业的发展方向。实现“随钻一串测”目前已取得一定进展，仍有很多瓶颈技术亟待解决。如要实现一次下井即可测得所有测井数据，需要解决的问题则更多，如数据传输、存储问题等。未来随钻测井技术将实现“一趟测”，并与“一趟钻”同步进行^[9]，不占用额外的作业时间，极大地简化作业流程，有效降低测井成本。“一趟测”技术能够在钻井过程中测量所需的所有测井信息，完成井下流体、岩心采样，同时提供地质导向、随钻油藏描绘等功能，从而大幅降低作业风险，提高储层钻遇率和单井产量。

17 耐超高温井下仪器及工具

为应对井下高温高压情况，需要使用耐高温高压的井下仪器、工具和材料，比如随钻测量（MWD）、随钻测井（LWD）、近钻头地质导向仪、井下电池、钻头、钻井液、导向工具、固井水泥、井下管材、完井工具等。随着技术的进步，井下工具、仪器与材料的耐高温耐压能力持续提升（图 16）。例如，国外 MWD

与 LWD、旋转导向钻井系统、螺杆钻具的最高耐高温能力已分别达到 200℃、200℃、230℃，钻井液的最高耐高温能力已达 260℃左右^[10]。

未来 10 年，随着石墨烯等新材料的引入以及封装、冷却、绝缘等技术的发展，井下仪器、工具的耐高温能力将整体超过 230℃，甚至有望达到 300℃，将有力地推动深层超深井层油气勘探开发和高温地热开发利用。

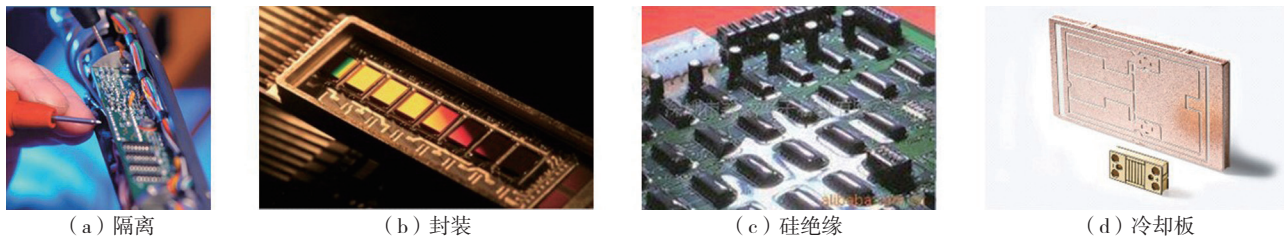


图 16 耐超高温井下仪器

18 智能钻井

未来的智能钻井主要由智能钻机、井下智能导向钻井系统、现场智能控制平台、远程智能控制中心组成，构成有机整体，实现闭环控制。具有机器学习能力的智能钻台机器人和智能排管机器人将取代钻台工和井架工，实现钻井作业的少人化。现场智能控制平台将代替司机完成所有操控，司机从复杂的操作中被解放出来，不必长时间坐在操作椅上，只需在一些特殊情况下才接管现场操作。地质导向、井下事故处理等关键作业可由远程智能控制中心的智能控制平台完成，

从而实现操作的远程化^[11-12]。

在未来超级钻头的配合下，未来的智能钻井将推行水平井超级一趟钻，即表层井段一趟钻，余下井段一趟钻，有望大幅度降低钻井成本（图 17）。

目前，国外已有油服公司和科创公司陆续推出钻井相关智能产品。预计 2025 年有望进入智能钻井初级阶段，开启智能钻井新时代。未来的智能钻井不是现有技术的简单升级，而是钻井技术的一次全方位深刻革命，将对钻井业和从业人员产生深刻影响，大幅度提升钻井效率、质量和安全性。

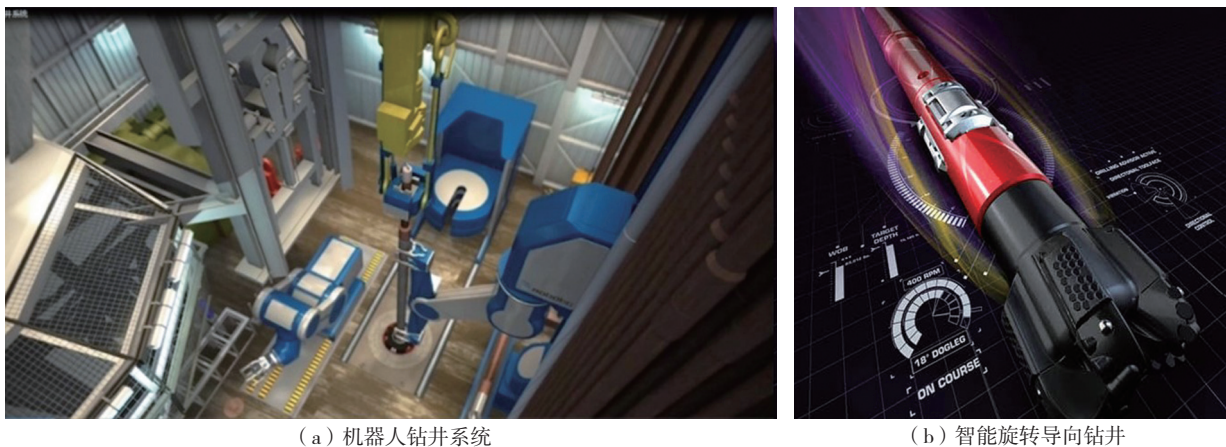


图 17 智能钻井

19 连续运动智能钻机

为提高起下钻和下套管的效率及安全性，挪威

WeST 钻井产品公司研制出一种连续运动钻机，已推出多款设计（图 18），主要具有如下特点。

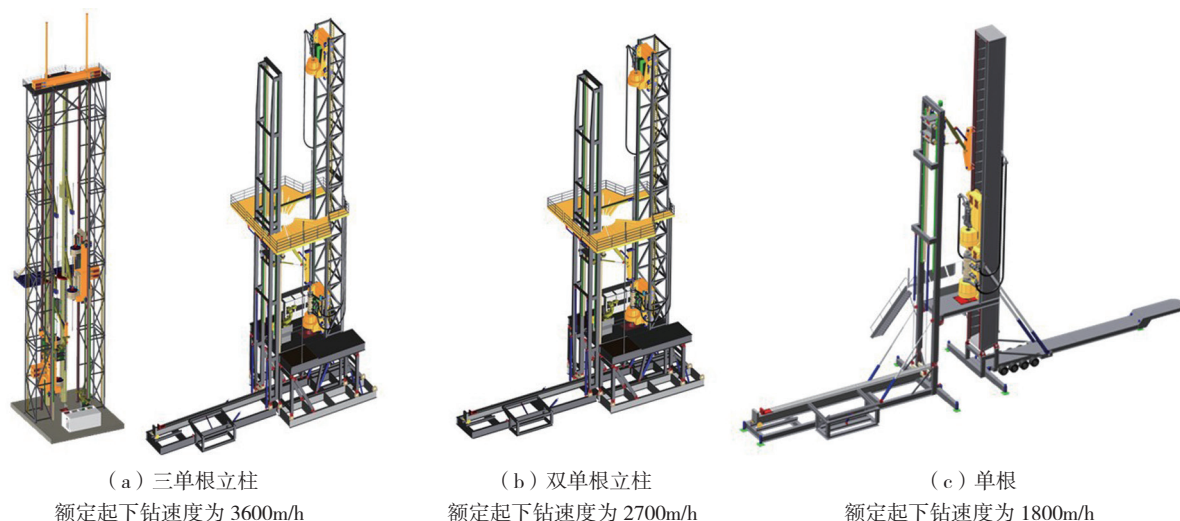


图 18 连续运动钻机设计

(1) 连续起下钻。钻柱在起下钻过程中完成上卸扣，而不像常规钻机那样需要停下来进行上卸扣。额定起下钻速度分别为 3600m/h、2700m/h、1800m/h，而常规钻机起下钻速度只有 600 ~ 900m/h。

(2) 连续下套管。套管在连续下入过程中完成连接。额定下套管速度为 900m/h。

(3) 连续循环。在起下钻和钻进过程中，钻井液循环不间断，有利于实施控压钻井，提高作业安全性。

(4) 连续送钻。在钻进过程中，不用为接单根而停钻和停泵，可以边钻进边接单根，从而提高作业效率。

连续运动钻机已进行现场测试（图 19），一旦投入商业应用将成为新一代钻机，代表了钻机技术一次新的革命。随着人工智能引入石油钻井，未来将出现连续运动智能钻机，将用人工智能机器人取代钻台工和井架工，进一步提高作业效率和安全性。

20 双壁管反循环钻井

挪威 Reelwell 公司经过多年研究，推出了新的反循环钻井技术——Reelwell 钻井技术，作为双壁管反循环钻井（图 20）^[12]，主要具有如下特点。

(1) 钻井液在管中管内反循环。钻井液通过顶驱和顶驱旋转接头向下泵入管中管的环形空间，从钻头喷嘴喷出，带着岩屑向上流入底部钻具组合与井壁之间的环形空间。因防喷器上方装有旋转控制头，将管中管与井壁之间的环形空间封死，上返的钻井液连同岩屑只得通过靠近井底的双浮阀进入管中管的内管，



图 19 连续运动钻机样机

上返至地面，从而消除岩屑床问题，利于储层保护。

(2) 管中管充当电力和数据传输通道。管中管的内管外壁经过绝缘处理，充当同轴电缆，可以向井下供电，还能实现数据的实时、高速、大容量、双向传输，数据传输速率高达 6.4 万位/s。

(3) 实现全过程控压钻井。井筒环空充满清洁流体，与管中管内的钻井液具有不同的密度，可实现双梯度钻井，且可通过地面流量控制装置实现控压钻井，



图 20 双壁管反循环钻井

更好地解决窄密度窗口问题，减少非生产时间，提高作业安全性。

该项技术已在陆上和海上进行了多次现场试验。一旦投入商业应用，将成为钻井技术一次重大突破，并有望实现无隔水管钻井。

21 结束语

智能化是世界科技发展的大趋势，也是油气工业发展的大趋势。人工智能与油气工业融合发展，将引领油气技术颠覆性创新，推动油气工业从数字化迈向智能化。智能化将成为未来油气工业技术创新的主攻方向之一，将给石油工业带来一场全方位革命，催生智慧地质、智能油田、智能物探和智能钻井等。与此同时，为了增储上产和降本增效，油气勘探开发领域还将陆续推出或应用一些新技术、新工艺、新方法、新工具、新材料，它们与智能化一起将创造油气工业美好未来。

【参考文献】

[1] Robinson K A. Drilling in the digital age: A new world begins to take shape[J]. Drilling Contractor, 2018,74(3).
 [2] 张金华, 方念乔, 魏伟, 等. 天然气水合物成藏条件与富集控制因素 [J]. 中国石油勘探, 2018, 23(3): 35-46.
 Zhang Jinhua, Fang Nianqiao, Wei Wei, et al. Accumulation conditions and enrichment controlling factors of natural gas hydrate reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(3): 35-46.
 [3] 杨远, 肖传桃, 李永臣, 等. 基于 ICP 技术的天然气水合物开采方案 [J]. 中国石油勘探, 2017,22(5): 111-118.
 Yang Yuan, Xiao Chuantao, Li Yongchen, et al. Exploitation of natural gas hydrate based on ICP technology[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(5): 111-118.
 [4] Mosher C, Chengbo Li, Yongchang Ji, et al. Compressive Seismic

Imaging: Moving from research to production[C]. Houston: 2017 SEG International Exposition and 87th Annual Meeting, Expanded Abstracts:74-78.
 [5] Chengbo Li, Mosher C, Janiszewski F, et al. Aspects of implementing marine blended source acquisition in the field[C]. Houston: 2017 SEG International Exposition and 87th Annual Meeting, Expanded Abstracts:42-46.
 [6] Benavidez A. SEG Conference to tout new exploration technologies [J/OL]. E&P Hart Energy, September 2017. <https://www.epmag.com/seg-conference-tout-new-exploration-technologies-1657666>.
 [7] 唐海全, 肖红兵, 李翠, 等. 基于随钻测井的地层界面识别方法 [J]. 天然气勘探与开发, 2016,39(4):8-12.
 Tang Haiquan, Xiao Hongbing, Li Cui, et al. Methods to identify formation boundary based on logging-while-drilling[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2016,39(4):8-12.
 [8] 朱桂清, 王晓娟. 光纤传感器改善油气井检测 [J]. 测井技术, 2014,38(3):251-256.
 Zhu Guiqing, Wang Xiaojuan. Fiber optic sensing for improving wellbore surveillance[J]. Well Logging Technology, 2014,38(3): 251-256.
 [9] 杨金华, 郭晓霞. 一趟钻新技术应用与进展 [J]. 石油科技论坛, 2017, 36(2): 38-40.
 Yang Jinhua, Guo Xiaoxia. Application of new technology - Single bit-run drilling[J]. Oil Forum, 2017, 36(2): 38-40.
 [10] Stefánsson A, Duerholt R, Schroder J, et al. A 300 degree celsius directional drilling system[R]. SPE 189677, 2018.
 [11] Hsieh L. Schlumberger rig of the future aims to optimize, integrate drilling subsystems to provide open and scalable well construction platform[J]. Drilling Contractor, 2018, 74(1).
 [12] Vestavik O M, Thorogood J. Horizontal drilling with dual-channel drillpipe[R]. SPE 184683, 2017.