

◀低碳减碳▶

doi:10.11911/syztjs.2022070

引用格式: 蒋海军, 耿黎东, 王晓慧, 等. 国外石油工程碳减排技术与作业管理发展现状及启示 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 125-134.

JIANG Haijun, GENG Lidong, WANG Xiaohui, et al. Carbon emission reduction technologies and operation management in petroleum engineering abroad: up-to-date status and implications [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 125-134.

## 国外石油工程碳减排技术与作业管理发展现状及启示

蒋海军, 耿黎东, 王晓慧, 光新军

(中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

**摘 要:** 随着世界各国“双碳”目标的提出, 能源结构低碳化转型成为必然, 传统石油工程作业中的碳减排已成为国内外石油公司的关注重点。概述了国外大型油公司和油服公司的低碳转型发展策略, 从电动化装备、井下工具、井下流体、工艺技术和信息技术等方面, 介绍了国外石油工程碳减排技术的发展现状, 并从地质工程一体化、“工厂化”钻井模式 2 方面介绍了国外石油工程碳减排作业管理模式的发展现状。我国石油工程碳减排技术与作业管理模式取得了较大进展, 但与国外相比, 差距仍然较大。为此, 基于国外石油工程碳减排技术和作业管理的发展现状, 得到了我国石油工程碳减排技术发展的几点启示: 做好石油工程碳减排技术顶层设计, 加大碳减排工程技术创新力度, 优化石油工程管理模式, 加强政策扶持, 加速推进石油工程碳减排人才队伍建设。这对推动我国石油工程行业碳减排技术发展、加快油气行业绿色低碳转型和高质量发展具有现实意义。

**关键词:** 石油工程; 碳减排; 低碳技术; 工程管理; 技术现状; 发展建议

**中图分类号:** X321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2022)05-0125-10

## Carbon Emission Reduction Technologies and Operation Management in Petroleum Engineering Abroad: Up-to-Date Status and Implications

JIANG Haijun, GENG Lidong, WANG Xiaohui, GUANG Xinjun

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co. Ltd., Beijing, 102206, China)

**Abstract:** As countries around the world put forward their “dual carbon” targets (carbon peaking and carbon neutrality), the low-carbon transformation of the energy structure has become inevitable, and carbon emission reduction in traditional petroleum engineering operations has attracted the focus of oil companies both in China and abroad. The development strategies of large oil companies and oil service companies abroad for low-carbon transformation were summarized, and the up-to-date carbon emission reduction technologies in foreign petroleum engineering were introduced from the aspects of electrified equipment, downhole tools, downhole fluids, process technologies, and information technologies, etc. Then, the up-to-date status of operation management modes for carbon emission reduction in petroleum engineering abroad were discussed from the perspectives of geological-engineering integration and the “factory-like” drilling mode. China's emission reduction technologies and operation management modes in petroleum engineering have also made substantial progress, although they still have a long way to go compared with their international counterparts. For this reason, some enlightenments for the development of carbon emission reduction technologies in petroleum engineering in China were proposed on the basis of analyzing the up-to-date carbon emission reduction technologies and operation management in petroleum engineering abroad. Specifically, they are conducting solid top-level design for carbon emission reduction technologies in petroleum engineering, stepping up engineering technology innovation for carbon emission reduction, optimizing management modes in petroleum engineering, reinforcing policy support, and accelerating the construction of talent team for carbon emission reduction in petroleum engineering. The results have practical significance for promoting the development of carbon emission reduction technologies in petroleum engineering and accelerating the green and low-carbon transformation and high-quality

收稿日期: 2022-02-28; 改回日期: 2022-03-23。

作者简介: 蒋海军 (1972—), 男, 四川绵阳人, 1994年毕业于西南石油学院石油工程专业, 1997年获西南石油学院油气井工程专业硕士学位, 2000年获石油大学(北京)油气井工程专业博士学位, 主要从事石油工程战略规划方面的研究与管理工。E-mail: jianghj.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中石化基础前瞻项目“油气上游低碳和储氢技术发展策略研究”(编号: P21074-1)资助。

development of the oil and gas industry in China.

**Key words:** petroleum engineering; carbon emission reduction; low-carbon technology; engineering management; up-to-date technology status; suggestion for further development

2020年9月,中国宣布力争于2030年前达到二氧化碳排放峰值,2060年前实现碳中和,向世界展现了中国推动构建人类命运共同体的责任担当。全球约75%的温室气体排放来源于能源使用,油气行业作为重要的排放来源,绿色低碳转型发展已迫在眉睫<sup>[1-3]</sup>,为此,国外大型油公司和油服公司均采取了一系列绿色低碳转型策略。其中,以BP、壳牌、埃尼公司为代表的欧洲油公司的低碳转型态度激进,主张大幅削减油气产量和炼厂产能,迅速拓展新能源价值链,侧重发展光伏、风能、太阳能、氢能等新能源业务<sup>[4]</sup>;以埃克森美孚、雪佛龙为代表的北美油公司仍然看好传统油气市场的长期需求增长,采取了坚持以油气为主营业务,最大化利用现有资源,提升油气业务价值链,依托现有竞争优势发展CCUS、地热、氢能等低碳能源的策略<sup>[5]</sup>。斯伦贝谢、哈里伯顿和贝克休斯等国际大型油服公司在升级改造传统石油工程技术的基础上,将新能源业务作为新的业绩增长点,期望逐步向能源科技公司转型发展<sup>[6]</sup>。斯伦贝谢公司采用合作研发、投资收购等方式,在氢能、CCS、地热和锂电池制造等领域工程技术得到迅速发展,均处于现场先导试验阶段。哈里伯顿公司通过采用替代传统柴油燃料、提高电机设备效率、推进装备电动化和升级数字化技术等措施,减少工程作业过程中的温室气体排放,来减轻对环境的影响。贝克休斯公司通过采取高效动力、数字技术、油田排放管理高效解决方案和智能资产优化管理等措施,来解决排放源减排的问题。

为了实现碳中和目标,我国也加快对低碳技术研发、低碳产业发展的投资,碳排放管理和服务逐渐兴起,低碳和减排技术逐渐推广应用,低碳产业快速发展,低碳经济增长显著加快<sup>[2]</sup>,但是与国外油公司及油服公司相比,技术水平与管理模式的差距仍然较大。为此,在分析国外石油工程碳减排技术及其作业管理发展现状的基础上,提出了对我国石油工程行业碳减排技术发展的几点启示,为我国油气行业绿色低碳转型和高质量发展提供借鉴。

## 1 国外石油工程碳减排技术现状

石油工程碳减排技术,是指通过集成或改进现有工程技术、引入新一代信息技术,从而提高作业

效率、降低故障率,进而缩短作业时间、减小同等条件下工程作业的能源消耗因而获得碳减排效应的装备及工程技术<sup>[7-8]</sup>。目前,在电动化装备推广、井下工具研发、高性能井下流体研制、先进钻井技术和信息化技术等方面,均取得较大进展。

### 1.1 电动化装备快速推广

地面装备在作业过程中的碳排放量与其采用的动力源直接相关。电动化装备用电作动力,可以避免或减少柴油机的二氧化碳排放,进而获得减碳效应。目前,国外已经开发出电动钻机、混合动力钻机以及电动压裂系统并进行了推广应用,取得了不同程度的碳减排效果。

1) 电动钻机。与传统的柴油钻机相比,电动钻机以柴油发电机组或网电作为动力源,通过电传动装置驱动钻井装备,传动效率和可操作性大大提高,燃料消耗、噪音和粉尘污染都大幅降低<sup>[9]</sup>。目前,电动钻机广泛采用交流变频调速电动机驱动方式,也是石油机械最好的动力供给方式。美国NOV公司和IRI公司、加拿大Dreco公司、德国西门子公司等均研制出交流变频顶部驱动系统。NOV公司基于交流变频驱动系统的单速齿轮传动机构,研制了TDS-8型、TDS-10型和TDS-1000型等3种交流变频顶驱装置,其中,TDS-8型电动顶驱既可用于海上钻机,又可用于大型陆地钻机;TDS-10型电动顶驱则适用于中小型陆地钻机、海上平台钻机和自升式平台钻机;TDS-1000型电动顶驱则主要用于深井钻机。加拿大Canrig公司生产出5种型号的交流变频顶驱装置,具备变速和矢量控制功能,既可以使输出的扭矩具有平衡性,又具备较宽的调速范围。

2) 混合动力钻机。单台柴油机组的能量转换效率和污染排放水平与机组负载状态密切相关,大部分作业情况下,钻机控制系统很难保证每台柴油发电机组都处于最佳负载状态,从而导致能源浪费和高污染问题。为此,国外引进了锂电池储能技术,利用混合动力管理系统来调节机组负载配置,从而提高钻机运行效率,降低碳排放量。2018年,美国Patterson-UTI公司研制了全球首台柴油机组+锂电池组的混合动力APEX钻机,利用动力管理系统(GenAssist)实现柴油机组和锂电池组负载的最优配置,当钻机动力需求与柴油机组输出功率不匹配

时, 锂电池组主动介入, 参与储能或释能, 在保证钻动力平稳输出的前提下提高燃油效率。挪威 Seadrill 公司在 West Mira 超深水钻井平台上使用了 4 组锂电池储能模块, 柴油消耗量降低了 42%, 二氧化碳排放量减少 15%。

3) 全电动压裂系统。压裂增产过程中, 常规压裂系统采用柴油机组作为动力源, 需要耗费大量的柴油, 导致能耗高、污染大, 为此, 国外开展了电动压裂系统研究。2020 年, 哈里伯顿公司推出了业内首个全电动压裂系统(见图 1), 该系统主要由 Zeus<sup>TM</sup> 电动压裂泵、ExpressBlend<sup>TM</sup> 电动混砂车系统、技术指挥中心 (tech command center, 简称 TCC)、电动试井单元和供电、供水等辅助设备组成<sup>[10]</sup>。Zeus<sup>TM</sup> 电动压裂泵在业内率先实现了 3.498 m<sup>3</sup>/min 排量下能持续提供 3 675 kW 的功率, 由于未采用柴油机组作为动力, 压裂作业的污染物排放量大大降低, 低于美国能源署的 Tier 4 排放标准。ExpressBlend<sup>TM</sup> 电动混砂车系统具有业内最少的支撑剂转运点, 有效消除了粉尘排放, 且采用无放射性的支撑剂浓度测量方法, 降低了安全和健康风险。此外, 该混砂车系统还具有远程操作功能和冗余设计, 提高了装备的自动化程度和可靠性, 其最大排量和最大输砂能力分别可达 19.080 和 4.955 m<sup>3</sup>/min。哈里伯顿公司将电动压裂和电动试井作业相结合, 形成了一体化完井 (integrated well completions, 简称 IWC) 单元, 由 TCC 统一指挥。全电动 TCC 与电动绞车配合使用, 电动绞车安装在拖车上, 采用直驱电机的动力传输系统, 不再需要单独的测井车, 也不再依靠柴油机提供动力, 从而有效降低了噪音污染和排放污染, 且降低了因使用易发生故障的链条和齿轮箱导致的地面设备失效风险。IWC 单元可以通过手持遥控设备或位于 TCC 中的常规绞车控制面板远程操控。2021 年 8 月, 切萨皮克能源公司在 Marcellus 页岩气区块成功应用了哈里伯顿公司的电动压裂系统和 VoltaGrid LLC 公司的先进发电系统, 污染物排放减少了 32%。

## 1.2 井下工具研发力度加大

井下工具直接关乎作业效率、作业周期和作业安全。高性能井下工具可以提高作业效率, 进而缩短作业时间, 减少同等条件下工程作业的能源消耗, 进而产生减碳效应。目前, 国外已经开发出不同类型的新型 PDC 钻头和提速工具, 不同程度地缩短了钻井作业周期, 从而减少了钻井作业中的二氧化碳排放。

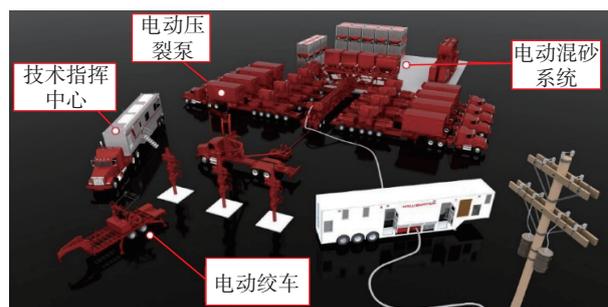


图 1 哈里伯顿公司全电动压裂系统基本组成

Fig.1 Basic components of the all-electric fracturing system of Halliburton

### 1.2.1 新型 PDC 钻头

国际油服公司在钻头智能化、个性化、定制化和长寿命等方面不断加大研发力度, 研制出种类丰富的新型 PDC 钻头, 提速效果明显。

1) 脱钻 PDC 钻头和防泥包 PDC 钻头。脱钻工艺可以将 PDC 钻头表面的钻通过酸蚀除掉, 深度可达 200 μm, 可大幅降低退化风险, 改善钻头耐热性能。斯伦贝谢公司研制的脱钻 PDC 钻头在印度 Barmer 盆地 3 口井的硬地层中累计钻进 2 328 m, 平均机械钻速 10.7 m/h, 相比普通 PDC 钻头钻进时间减少了 47%, 同时钻头磨损较小。防泥包 PDC 钻头应用了防泥包镀层工艺, 即利用镍磷耐磨加厚处理和电镀处理形成强化学键, 从而提高钻头表面光滑度, 达到防泥包的目的。斯伦贝谢公司的防泥包钻头在沙特 3 口井进行了现场应用, 机械钻速比邻井至少提高 23%, 单位长度钻井费用比邻井至少节约 8%。

2) 新型切削齿 PDC 钻头。史密斯钻头公司研制了 ONYX 360°可旋转切削齿 PDC 钻头, 齿座以铜焊方式镶嵌至刀翼位置, 固定切削齿并允许其旋转。钻进过程中, 其切削齿可 360°自由旋转, 齿边缘完全接触地层, 达到均匀磨损, 从而有效延长钻头寿命。该钻头在美国 Oklahoma 地区研磨性极高的石英砂地层进行了应用, 相比常规 PDC 钻头, 单只钻头进尺增加了 57%, 机械钻速提高了 44%<sup>[11]</sup>。贝克休斯公司研制了 StayCool 波纹面 PDC 钻头, 其波纹复合片集成了波状轮廓的金刚石顶面、耐磨金刚石材料等, 有效降低了复合片表面的摩擦力, 可使钻井过程中切削齿产生的热量下降 20%, 有效降低了切削齿出现热损坏的概率, 从而延长钻头寿命。波纹面 PDC 钻头在 Oklahoma 地区 Woodford 油田硬砂岩和硬石灰岩中的应用效果表明, 机械钻速提高了 10%, 单只钻头进尺增加了 37%<sup>[12]</sup>。史密斯公司研制了 Aegis 铠装金刚石钻头, 其刀翼边缘

覆盖有一层用电子束熔融技术制成的耐腐蚀碳化钨钢带,耐腐蚀性提高400%,强度提高40%<sup>[13]</sup>,有效延长了钻头寿命。

3)混合布齿PDC钻头。哈里伯顿公司研制了Crush & Shear<sup>TM</sup>混合布齿PDC钻头(如图2所示),钻头中心的锥形牙轮可实现对地层的有效压碎,移末端面的刀翼可实现最大的岩石剪切量,中心区域的凹陷设置有效减小了钻头的横向振动,中心位置的滚子可保证压碎地层的同时减小扭矩波动,从而使该钻头具有很高的破岩效率。该钻头在美国中部陆地油气田进行了应用,一趟钻完成了长度184.4 m的定向井段,平均机械钻速达到7.53 m/h,与邻井相比提高了25%<sup>[14]</sup>。



图2 Crush & Shear<sup>TM</sup>混合布齿钻头  
Fig.2 The Crush & Shear<sup>TM</sup> hybrid bit

4)流道优化型PDC钻头。Ulterra公司研制了SplitBlade PDC钻头,改进了每个主刀翼上的流道,精细设计了钻头台肩和锥体上的喷嘴,有效改善了岩屑排出效果,现场试验表明,机械钻速提高了30%。Varel石油公司设计了一种新型钻头弯曲喷嘴,主要由内置弯曲硬质合金喷嘴和钢质保护套组成,内置弯曲喷嘴前缘微凸,钢质保护套外部结构与常规喷嘴相同(如图3所示)。内置弯曲喷嘴安装在钢质保护套内,便于调整射流方向,钢质保护套通过螺纹安装在标准钻头上。该钻头可在不产生额外钻头压降的前提下,延长射流等速核长度并优化射流方向,从而改善井底流场结构,提高井底水力能量利用效率。

#### 1.2.2 钻井提速工具

常见的提速工具主要包括提高破岩能量类工具和平稳钻井工况类工具2大类。

1)提高破岩能量类工具。它们利用轴向或周向冲击提高破岩能量、减少粘滑振动,以提高钻井速度,主要代表产品有扭力冲击器、旋冲钻具等。Ulterra



图3 内置弯曲喷嘴及钢质保护套

Fig.3 Built-in curved nozzle and steel protective sleeve

公司的Torkbuster是最具代表性的扭力冲击器,已在国外油田实现商业化规模应用,机械钻速平均提高0.2~10.0倍,在我国塔里木、元坝、塔河等油气田也取得良好的应用效果<sup>[15]</sup>。NOV公司的Fluid Hammer旋冲钻具由马达总成和冲击短节2部分构成,振动冲击短节是其核心工具。钻井过程中,钻井液驱动上部螺杆转子高速旋转,带动花键心轴及下接头一起高速旋转,为钻头提供破岩扭矩;同时,下凸轮与上凸轮产生突变啮合,进而产生突变冲击力,为钻头提供破岩动力<sup>[16]</sup>。

2)平稳钻井工况类工具。它们通过水力或机械作用,减小钻井过程中的有害振动,保持钻头钻压、扭矩稳定,达到提高机械钻速和保护PDC钻头的目的,主要包括恒扭器、减振器、水力振荡器等工具。Tomax公司的AST恒扭器可以有效防止粘滑振动,在20 ms内即可平衡钻头所受载荷<sup>[17]</sup>,它安装在靠近钻头位置,当上部钻具的钻压、扭矩波动时,其芯轴相对于外壳可以螺旋进行回缩或伸出,碟簧系统进行相应的储能与释放,保证下部钻头的钻压扭矩相对稳定,使钻头切削力和摩擦力保持最佳匹配状态。AST恒扭器在北海白垩纪硬地层的试验结果发现,钻井周期缩短了12 d,钻井成本降低了15%~20%。NOV公司的Agitator减振工具由减振器、动力部分、阀片和轴承等组成,减振器进行轴向振动,使钻柱处于运动状态而减小摩阻、提高钻压传递效率,同时增强对工具面的控制,进而减少钻井过程中粘滑现象的产生。该工具在越南库隆盆地花岗岩地层中的应用效果发现,提速效果显著,钻井时间缩短了21%<sup>[18]</sup>。Scout公司SWOBT稳压降扭工具采用螺杆钻具的压耗作为振动的信号和降低钻柱振动的动力源。基于特殊的结构设计,该工具可根据钻井液压力调节长度。当钻头破岩扭矩增大时,钻柱内钻井液压力增大,工具长度缩短,从而减小钻

头破岩扭矩;当钻头破岩扭矩减小时,螺杆钻具产生较小压耗,钻井液压力降低,工具长度增大,从而增大钻头破岩扭矩。在美国得克萨斯州 WOOD 公司 1 口井的试验结果显示,该工具有效降低了井下钻柱振动,延长了钻头寿命,平均机械钻速 22.0 m/h,钻井效率大幅提高<sup>[19]</sup>。

### 1.3 井下流体性能提升

高性能井下流体可以有效减少井塌、井漏、井喷和卡钻等井下故障,缩短钻井周期,提高钻井效率,从而降低作业过程中的能耗和碳排放。目前,国外研究和应用了高性能水基和油基钻井液体系、抗高温水基钻井液体系等,不同程度地降低了复杂时效,减少了钻井作业的二氧化碳排放。

#### 1.3.1 高性能水基钻井液

英国 MGS 公司研制了 Pure-Bore 水溶性聚合物,该聚合物采用特殊分子结构设计,富含羟基、胺基等吸附基团,具有高剪切稀释性,分子间相互交联形成网状结构,可大幅度降低钻井液当量密度。在分子尺度上, Pure-Bore 水溶性聚合物是一种纳米封堵材料,可有效封堵地层的微裂缝,降低钻井液的滤失量。MGS 公司以 Pure-Bore 水溶性聚合物为主剂,配制了高性能水基钻井液体系,典型的盐水钻井液体系配方为: 1.7% Pure-Bore+1.7% 防漏堵漏剂+5.0%KCl+25.0%NaCl+0.2%NaOH+重晶石。在该钻井液体系中, Pure-Bore 水溶性聚合物可以作为钻井液的抑制剂、流型调节剂、降滤失剂和润滑剂等,实现了一剂多用,有效减少了钻井液体系的成分,易于现场应用和性能维护。

斯伦贝谢 M-I SWACO 公司研制了 ULTRADRIL 高性能水基钻井液,主要处理剂包括 ULTRAHIB、ULTRAFREE ROP 和 ULTRACAP PLUS。其中, ULTRAHIB 为聚胺类页岩抑制剂,通过黏土活性形成化学键,紧密堆积阻止水分子进入黏土颗粒间的孔隙,从而抑制黏土水化; ULTRAFREE ROP 为表面活性剂,可包覆在钻屑和金属表面,可有效降低因黏土水化可能造成的卡钻风险,从而提高钻速; ULTRACAP PLUS 为小分子量丙烯酸共聚物类页岩抑制剂,能够有效包裹钻屑、抑制岩屑因水化而粘结。该水基钻井液在阿布扎比海上油气田进行了应用,解决了 Laffan 和 NahrUmr 地层的井壁失稳问题,提前 9 d 钻穿厚 900 m 的非均质层状页岩地层<sup>[20-21]</sup>。

#### 1.3.2 非水基钻井液体系

哈里伯顿公司研制的新型流型调节剂 RM 具有较低的生物毒性,  $LC_{50}>0.000\ 001\ \text{kg/L}$ , 28 d 生物降

解率达 66.5%。该公司以 RM 为关键处理剂,配制了新型油基钻井液体系,其流变性稳定,温度 4.5~66.0 °C 范围内具有相近的动切力、静切力和低剪切流变性,非常适合深水钻井。

贝克休斯公司研发的非水基钻井液体系 DELTA-TEQ 由黏土和聚合物构成,具有可转变的凝胶结构,在循环停止时能够迅速胶结,以便悬浮岩屑;在恢复钻井液循环或下套管期间,较低压力下凝胶破裂,可保护地层并降低漏失风险。DELTA-TEQ 钻井液在墨西哥湾的一个油气田进行了现场应用,密度 1.16~1.60 kg/L,流变性稳定,能有效降低泵压,消除流速限制,实现安全钻井<sup>[22]</sup>。

#### 1.3.3 抗高温钻井液体系

哈里伯顿公司以 BDF-637 聚合物为关键处理剂,研制了 BaraXtreme 高性能抗高温无黏土水基钻井液体系,该体系可以用清水或者一价的盐水(例如氯化钠)快速配制<sup>[23]</sup>,在温度 227 °C 时仍具有良好的黏度和降滤失性,且无需加入黏土等来维持其固相悬浮能力。

M-I SWACO 公司研制的 VeraTherm 抗高温水基钻井液,在温度超过 150 °C 时仍具有良好的稳定性和低剪切流变性,可确保井眼清洁和岩屑悬浮,综合性能优于甲酸盐钻井液和常规聚合物钻井液。VeraVis 支化聚合物是该钻井液的关键处理剂,具有调节流变性与控制滤失量的双重功能,其独特的支化特性使其具有与常规聚合物类似的流变学性质,但抗温性显著提升<sup>[24]</sup>。该钻井液在中东某高温探井进行了应用,在井眼内超过 7 d 时仍保持稳定的流变性,钻进期间未发生卡钻、井壁失稳等井下故障,表现出优异的长期抗温稳定性。

### 1.4 新型钻井技术驱动降本提效

应用新型钻井技术来提高钻井速度和作业效率,降低钻井能耗,也是减少碳排放的重要手段之一。

#### 1.4.1 小井眼安全钻井技术

在满足安全成井和开发需求的前提下,采用小井眼钻井可以大大降低钻完井材料、返排物处理和能耗等各项费用。壳牌公司在 Marcellus 页岩气开发时应用了小井眼钻井技术,页岩气井采用了小井眼三开井身结构(如图 4 所示),降本增效显著<sup>[25]</sup>;与采用常规井身结构的页岩气井相比,单井套管钢材平均消耗从 210 t 降低至 125 t,水泥消耗减少 34%,钻井成本显著降低;三开井段采用  $\phi 171.5\ \text{mm}$  七刀翼 PDC 钻头+ $\phi 127.0\ \text{mm}$  动力钻具+ $\phi 114.3\ \text{mm}$  钻杆

钻进,配合使用井下轴向振荡器,减少了轴向摩擦,提高了钻压传递效率及机械钻速,同时,在不影响切削效率的前提下,增大了排屑槽面积,降低了切

向和径向作用力,延长了钻头寿命;采用新型顶驱控制系统,其动态旋转控制装置缓解粘滑效应,轴向振动装置可减小轴向摩擦而提高钻压传递效率。

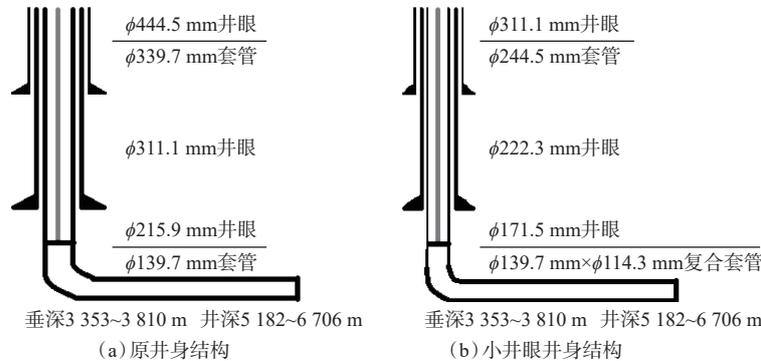


图4 Marcellus页岩气井小井眼井身结构设计

Fig.4 Casing program design for slim wellbore of Marcellus shale gas wells

#### 1.4.2 微井眼安全钻井技术

微井眼是指直径小于88.9 mm的井眼,一般应用连续油管或高压水射流钻进,径向水平井钻井技术、高压磨料喷射钻井技术和鱼骨井增产技术等均属于微井眼钻井技术<sup>[26-29]</sup>。与常规井眼相比,微井眼具有直径小、钻井装备功率低和地层破岩量少等特点。相比传统钻井方式,微井眼钻井不需接单根,可以不间断钻进,易实现井底压力的稳定和有效控制,且地面钻机和井下工具更容易实现电动化,有利于降低能耗和碳排放。目前,国外连续油管微井眼钻井地面装备逐步成熟,配套工具基本完善,自动化程度较高,微井眼环空压耗与携岩、连续管屈曲与自锁等基础理论已基本形成,“精准化、集成化、实时化和智能化”的发展趋势明显;径向水平井的钻进长度最长可达100 m,钻压施加方式以液力加压和喷头自进为主。挪威Fishbones AS公司研发的裸眼完井鱼骨井增产技术最多可形成多达400个 $\phi 12.0$  mm的侧向分支井眼,目前已在煤层气直井、碳酸盐岩水平井和致密砂岩水平井中得到广泛应用,该技术可使碳酸盐岩水平井产量提高8.3倍<sup>[30-31]</sup>。

#### 1.4.3 激进参数钻井技术

激进参数钻井是指在现有钻机及其配套设备条件下,通过调配钻井泵,优选钻头、螺杆等钻井工具,强化钻压、转速、泵压和排量等钻井参数,达到提高钻井速度和作业效率的一种钻井技术。目前,该技术已在海外页岩油气开发中广泛应用,国内也正在大力推广,大幅提高了作业效率,降低了钻井

成本。2016年开始,Range公司在Marcellus页岩气区块推广激进参数钻井技术,配套了2台1470 kW的超大功率钻机,推出了高效钻机5项入门标配:全交流变频电动钻机,2~3台1100 kW双燃料发电机,绞车功率1100~1470 kW;顶驱额定载荷500 t,最大持续钻井扭矩50.8 kN·m;3台1176~1470 kW( $\phi 114.3$  mm缸套,最大工作压力为52 MPa)钻井泵+振动筛;循环系统压力等级52 MPa;钻机全负重步进式井间或平台间自主搬迁(72 h平台间移动)。在提高钻井装备性能的同时,采用高钻压、高转速、大排量钻进,将钻井泵的额定压力由35 MPa增加至53 MPa,钻压控制在120~200 kN,转速控制在110~200 r/min,排量控制在33 L/s,造斜率控制在 $(10^{\circ}\sim 12^{\circ})/30$  m,钻井泵泵压控制在35 MPa左右。该公司应用激进参数钻井技术后,钻井提速效果明显,钻井速度由2012年的79.25 m/d提高至2018年的329.18 m/d,单位长度水平段的钻井成本降低了69%。

#### 1.5 信息技术与工程技术逐渐融合

大数据、人工智能、5G等信息技术在石油工程中的应用越来越普遍,有力推动了石油工程技术的发展<sup>[32-33]</sup>:一方面推动石油工程产业向少人或无人化方向发展,加速全产业链的一体化融合;另一方面有助于钻井参数和压裂参数优化,提高作业效率,进而降低能耗和实现碳减排。

为了有效收集、管理和应用各种数据,康菲石油公司构建了基于大数据的人工智能分析平台(IDW)<sup>[34]</sup>,如图5所示。该平台是一个涉及多部门的集中式数据存储中心,将地质、油藏、钻井、开发

和生产运行等不同数据库进行整合,实现跨功能集成。该平台在美国鹰滩页岩油气区的应用效果表明,钻井周期平均缩短 50%,单井产量平均提高 20%。斯伦贝谢公司基于微软 Azure 云计算平台和 Azure Stack 混合云平台开发了 DELFI 勘探开发信息

平台<sup>[35]</sup>,利用机器学习、大数据分析、可视化和高性能计算等数字化技术,更大范围、更大程度地增强地球物理、地质、油藏工程、钻井完井和生产领域之间的互通性,打破学科界限,真正实现上下游一体化。

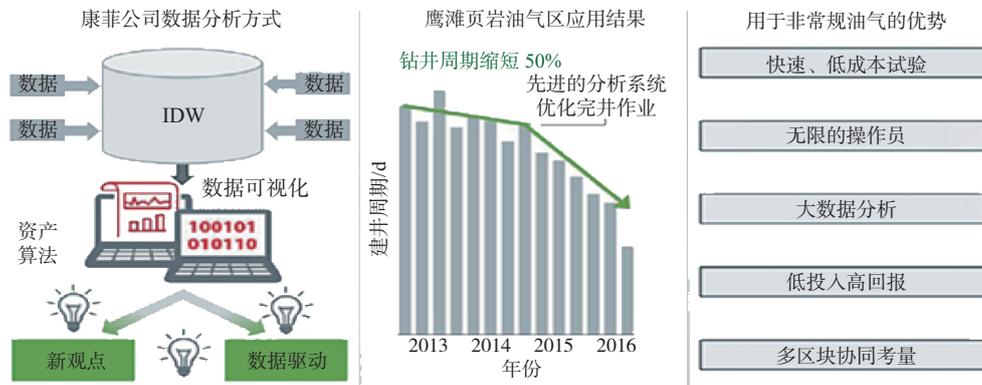


图 5 人工智能分析平台 (IDW) 应用效果及优势

Fig.5 Application effect and advantage of artificial intelligence analysis platform Integrated Data Warehouse (IDW)

BP 公司将增强现实 (augmented reality, 简称 AR) 眼镜应用于智能巡检中, 巡检人员可以通过 AR 眼镜读取传感器信息, 并与后方专家进行实时沟通, 专家可远程指导巡检人员处理设备问题<sup>[36]</sup>。麻省理工大学与埃克森美孚公司合作研发了水下机器人, 在海底缓慢移动的同时收集地震数据, 并利用机器学习算法提高勘探的准确性, 改变了潜水员和地质分析师从事水下勘探的传统方式。为应对恶劣极端环境下的井场巡检和硫化氢检测等问题, 壳牌公司研发了 Sensabot 远程操控机器人, 通过配备照相机、气体检测器和热成像仪等一系列设备, Sensabot 具有自动导航、自主避障和数据自动处理等功能<sup>[37]</sup>。沙特阿美公司的奥斯曼尼亚天然气工厂被誉为“灯塔工厂”, 利用先进的人工智能解决方案实现了工厂智能化和少人化, 利用无人机和可穿戴技术进行管道检测和设备维护, 将人工工作时间减少了 90%<sup>[38]</sup>。

## 2 碳减排石油工程作业管理现状

石油工程作业管理方式关乎不同技术环节协同和流程优化等诸多方面, 高效的作业管理方式可以充分释放技术及其组合的效能, 大幅提高生产时效、改善应用效果, 进而促进石油工程节能减排和低碳发展。为此, 国外大型油服公司不断优化石油工程作业管理方式, 在地质工程一体化及“工厂

化”钻井模式方面取得较大进展。

### 2.1 地质工程一体化不断深化

2010 年以来, 在石油工程技术进步的基础上, 地质工程一体化理念的成功应用促进了美国页岩气产量的爆发式增长。地质工程一体化的实质是管理革命, 核心是实现地质和工程跨学科、跨部门多元合作, 通过优化技术参数和优化管理流程提高作业效率、降低单位油气生产成本<sup>[39-41]</sup>。斯伦贝谢公司将地质工程一体化理念应用于 Permian 盆地的页岩气开发, 钻井费用下降 40%, 完井效率提高近 1 倍, 压裂有效性提高 35%, 最终可采储量 (EUR) 提高 20% 以上。不同区块的地质工程一体化应用模式不尽相同, 但归结起来主要表现在: 数据与工作平台一体化作为基础, 多学科多专业融合一体化作为核心, 建模与数模一体化作为关键, 管理与协作模式一体化作为保障。

### 2.2 “工厂化”钻井模式逐渐成熟

“工厂化”钻井模式是指在同一平台布置多口井, 使用标准化的装备和流程, 在系统化、标准化部署和设计的基础上, 进行专业化、流水线式的服务与施工, 形成批量化、规模化的作业模式。与普通钻井模式相比, “工厂化”钻井模式可以最大程度地提升钻井装备的有效动用时间和操作人员的有效工作时间, 推进资源利用最大化, 最大程度地降低成本和提高作业效率。目前, 北美已形成较成熟的“工厂化”钻井模式<sup>[42]</sup>: 1) “工厂化”平台部署与

井场优化设计,综合考虑三维地震资料、区域钻井地质环境因素描述资料、压裂模拟结果等多个因素,统筹部署“工厂化”钻井平台,优化钻井平台数量、布井方式、井眼轨道等,从而实现井网覆盖储层的最小井场面积;2)管理模式优化,建立统一的技术标准、统一的管理制度和统一的施工流程,打破传统钻井方式的限制,实现人与物的最优化组合;3)配套装备优化,普遍采用移动式钻机,在横向和纵向上均可移动,搬迁时只需移动钻机即可,节约了钻机搬迁时间和设备安装时间。北美不同地区油气井应用“工厂化”钻井模式后,钻井周期均得到缩短,从而达到减少能源消耗及二氧化碳排放的效果。例如,加拿大地桦页岩气项目平均储层深度约2 500 m,丛式井应用“工厂化”钻井模式,每个井场钻24口井,占地220 m×200 m,平均单井应用钻头数量减少超过83%,钻井周期缩短76%;同等条件下,有效减少了钻井作业中的二氧化碳排放。

### 3 对我国石油工程碳减排技术发展的启示

目前,我国油气供需矛盾依然突出,这就要求石油公司在碳中和约束下持续加大油气勘探开发力度。石油工程作为油气上游主要的碳排放来源,直接影响着油气行业“双碳”目标的实现。目前,我国主要采取应用更清洁的电能、提高能源利用效率和借助数字化技术等3项措施来实现石油工程碳减排,并取得一定进展:使用网电钻机,减少钻井作业的二氧化碳排放;使用全电动压裂装备及配套技术,减少压裂作业的二氧化碳排放;开发小型液压蓄能修井机,减少修井作业的二氧化碳排放;扩大飞轮储能装置配合天然气/柴油双燃料发动机的应用规模,提高能源利用效率;构建数字化生产指挥及远程决策系统,提高生产运行效率,减少二氧化碳排放。上述3项措施虽然总体与国外的措施相似,但装备和技术的成熟度和应用效果存在较大差距。若要推动我国石油工程作业的碳减排,实现石油工程碳减排技术大发展,根据国外石油工程碳减排技术和作业管理发展现状,可以得到以下几点启示:

1)要重视传统石油工程碳减排技术研发与应用,做好顶层设计。短时间内,碳减排技术仍是石油工程实现“双碳”目标的基础。在能源体系和结构实现全面转型、深度零碳和负碳技术全面成熟应

用之前,应继续加强传统石油工程碳减排技术的研发与推广应用,充分发挥碳减排技术的基础性作用。在全球积极应对气候变化的大背景下,国外大型石油企业已纷纷进行了碳中和战略布局,制定了分阶段的实现净零碳排放的战略路径。因此,国内石油公司应尽早制定石油工程碳减排技术发展专项规划,强化碳减排技术研发和推广力度,建立石油工程碳减排问题统一管理的归口部门,将碳减排任务与经济效益、考核指标挂钩,不断提升企业和员工的减排积极性。

2)要加大碳减排工程技术创新力度,促进石油工程业务低碳化。国外大型油服公司一直重视石油工程碳减排新技术研发,不断加大低碳工程技术投资力度,以减少石油工程业务的碳排放。因此,国内石油公司要逐步淘汰高能耗、低效率的油气装备,加快地面装备电动化改造速度,通过氢-电互补减少石油工程领域二氧化碳的排放量,研制新型PDC钻头和钻井提速工具,提升井下流体性能,推广应用新一代低成本、高效率钻完井技术,加大大数据、人工智能和云平台等信息技术的融合创新力度,发展智能钻完井技术,以不断提高机械钻速,降低井下故障发生率,缩短作业时间,减少能源消耗和碳排放。

3)要持续优化石油工程管理模式,保障碳减排目标顺利实现。北美页岩气革命表明,采用先进的石油工程管理模式可有效实现提质、提速、提效、提产、降本,但简单复制国外的石油工程管理模式却并不一定满足我国页岩油气高效勘探开发的需求。因此,应本着“因地制宜、试点先行”的原则,进一步解放思想、坚定信心,加快探索和实施地质工程一体化、“工厂化”钻井等先进的作业管理模式,保障资源高效利用、施工高效作业、装备高效运转和信息高效利用,实现“打成井、打好井、打快井”的目标,不断提高作业效率,以保证碳减排目标的顺利实现。

4)要加大内部政策扶持力度,加速推进石油工程碳减排体制机制和人才队伍建设。充分利用国家和行业相关扶持政策,探索以石油工程现场作业、施工单位和科研院所为依托,与国内外顶尖油服公司、信息企业、高等院校联合筹建石油工程碳减排技术重点实验室,提供专项资金支撑石油工程碳减排业务发展。同时,需加快石油工程碳减排技术人才梯队建设,通过吸引海内外高层次人才和创新团队,形成结构优化的石油工程碳减排人才梯队。

## 4 结束语

我国短期内对油气的依赖不会降低, 油气安全仍是影响能源安全的核心要素。“双碳”目标的提出, 对石油工程行业既是挑战也是机遇。在零碳和负碳技术全面推广应用之前, 持续提升石油工程技术水平, 以技术创新带动效率和效益提升, 仍将是石油公司实现碳减排的基本途径。加快地面装备电动化进程, 提升井下工具、井下流体性能, 加速新型高效、低成本钻完井技术推广应用, 加强新一代信息技术与石油工程的融合创新, 优化石油工程作业管理模式, 对于优化工程作业参数、提高作业效率、减少能耗和碳排放具有重要现实意义。着眼长远, 顺应能源低碳转型大势, 研发新型能源工程技术, 拓展石油工程减碳技术边界, 助推油气行业低碳转型的同时, 为全社会实现碳中和储备相关工程技术具有重要战略意义。

### 参 考 文 献

#### References

- [ 1 ] WANG Jianliang, FENG Lianyang, TANG Xu, et al. The implications of fossil fuel supply constraints on climate change projections: a supply-side analysis[J]. *Futures*, 2017, 86: 58–72.
- [ 2 ] 王敏生, 姚云飞. 碳中和约束下油气行业发展形势及应对策略[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(5): 1–6.  
WANG Minsheng, YAO Yunfei. Development situation and countermeasures of the oil and gas industry facing the challenge of carbon neutrality[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(5): 1–6.
- [ 3 ] 王天娇. 国际石油公司加强低碳转型探索[J]. *中国石化*, 2021(9): 9–13.  
WANG Tianjiao. The international oil companies strengthen the exploration of low-carbon transformation[J]. *Sinopec Monthly*, 2021(9): 9–13.
- [ 4 ] 司进, 张运东, 刘朝辉, 等. 国外大石油公司碳中和战略路径与行动方案[J]. *国际石油经济*, 2021, 29(7): 28–35.  
SI Jin, ZHANG Yundong, LIU Zhaohui, et al. Strategic path to carbon neutrality and action plan of large foreign oil companies[J]. *International Petroleum Economics*, 2021, 29(7): 28–35.
- [ 5 ] 王天娇, 徐学忠, 雪佛龙: 低碳业务动作频频[J]. *中国石化*, 2021(9): 32–36.  
WANG Tianjiao, XU Xuezhong. Chevron: low-carbon business acts frequently[J]. *Sinopec Monthly*, 2021(9): 32–36.
- [ 6 ] 范旭强, 陈明卓, 余岭. 国际油服公司转型发展策略及思考[J]. *国际石油经济*, 2021, 29(9): 8–15.  
FAN Xuqiang, CHEN Mingzhuo, YU Ling. Transformation and development strategy of international oilfield service company[J]. *International Petroleum Economics*, 2021, 29(9): 8–15.
- [ 7 ] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. *中国环境管理*, 2020, 12(6): 58–64.  
WANG Can, ZHANG Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020, 12(6): 58–64.
- [ 8 ] 黄晶, 孙新章, 张贤. 中国碳中和技术体系的构建与展望[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(9): 24–28.  
HUANG Jing, SUN Xinzhang, ZHANG Xian. Construction and prospect of the typological framework of technologies for carbon neutrality in China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2021, 31(9): 24–28.
- [ 9 ] 韩勇, 任艳辉, 张悦, 等. 石油钻井机械“电代油”配套技术研究[J]. *中国设备工程*, 2020(4): 190–192.  
HAN Yong, REN Yanhui, ZHANG Yue, et al. “Electricity replaces oil” supporting technology research of petroleum drilling machinery[J]. *China Plant Engineering*, 2020(4): 190–192.
- [ 10 ] Halliburton Company. All-electric fracturing-brochure[EB/OL]. [2022-02-17]. <https://www.halliburton.com/en/resources/zeus-all-electric-fracturing>.
- [ 11 ] BRUTON G, CROCKETT R, TAYLOR M, et al. PDC bit technology for the 21st century[J]. *Oilfield Review*, 2014, 26(2): 48–57.
- [ 12 ] Baker Hughes. Stay cool multidimensional cutter technology[EB/OL]. [2022-02-20]. <http://www.bakerhughes.com/products-and-services/drilling/drill-bit-systems/pdc-bits/staycool-multidimensional-cutter-technology>.
- [ 13 ] Schlumberger Company. Aegis armor cladding improve erosion resistance of steel-bodied bits[EB/OL]. [2022-02-17]. <https://www.slb.com/-/media/files/bdt/product-sheet/aegis-armor-cladding-ps.ashx>.
- [ 14 ] Halliburton Company. Crush & Shear™ hybrid bit technology improves drilling efficiency[EB/OL]. [2022-02-17]. <https://www.halliburton.com/en/resources/crush-shear-hybrid-bit-technology-improves-drilling-efficiency>.
- [ 15 ] 周祥林, 张金成, 张东清. TorkBuster 扭力冲击器在元坝地区的试验应用[J]. *钻采工艺*, 2012, 35(2): 15–17.  
ZHOU Xianglin, ZHANG Jincheng, ZHANG Dongqing. Experimental application of TorkBuster torsional impactor in Yuanba region[J]. *Drilling & Production Technology*, 2012, 35(2): 15–17.
- [ 16 ] 穆总结, 李根生, 黄中伟, 等. 振动冲击钻井提速技术现状及发展趋势[J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(3): 253–260.  
MU Zongjie, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Status and development trend of vibration-impact ROP improvement technologies[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(3): 253–260.
- [ 17 ] XUAN Lingchao, GUAN Zhichuan, HU Huaigang, et al. The principle and application of a novel rotary percussion drilling tool driven by positive displacement motor[R]. SPE 180535-MS, 2016.
- [ 18 ] Tomax Company. Anti stick-slip tool[EB/OL]. [2022-02-17]. <https://tomax.no/products/>.
- [ 19 ] NOV Company. Agitator technologies[EB/OL]. [2022-02-17]. <https://www.nov.com/products/agitator-technologies>.
- [ 20 ] JONES S, FEDDEMA C, SUGIURA J. A new steady weight-on-bit tool reduces torque and RPM variations and enhances drilling efficiency and bit/BHA life[R]. SPE 178818-MS, 2016.
- [ 21 ] MGS Company. Introduction and data sheet for pure bore water base fluids[EB/OL]. [2022-02-17]. <https://kicanada.com/Mine-Products.htm>.
- [ 22 ] Schlumberger Company. ULTRADRIL: the standard for high per-

- formance, ultra-inhibitive water-base drilling fluids[EB/OL]. [2022-02-17].<https://www.slb.com/-/media/files/mi/brochure/ultradril-brochure>.
- [ 23 ] Baker Hughes Company. DELTA-TEQ low-impact drilling fluid [EB/OL]. [2022-02-17].<https://www.bakerhughes.com/drilling/drilling-fluids/invert-emulsion-drilling-fluids/deltateq-lowpressureimpact-drilling-fluid>.
- [ 24 ] Halliburton Company. BaraStream®[EB/OL]. [2022-02-17]. <https://www.halliburton.com/en/products/barastream>.
- [ 25 ] Schlumberger Company. VeraTherm: high-temperature water-based drilling fluid[EB/OL]. [2022-02-17]. <https://www.slb.com/videos/veratherm>.
- [ 26 ] SCHUMACKER E, VOLGELSBERG P. Slimhole unconventional well-design optimization enables drilling performance improvement and cost reduction[J]. SPE Drilling & Completion, 2019, 34(4): 426–440.
- [ 27 ] 刘平全. 径向水平井技术发展及工具特点 [J]. 石油矿场机械, 2018, 47(1): 23–27.  
LIU Pingquan. Design and operation of descaling device used for tubing string[J]. Oil Field Equipment, 2018, 47(1): 23–27.
- [ 28 ] 贾建超, 廖华林, 于怀彬, 等. 水力喷射径向钻孔器的流场特性 [J]. 断块油气田, 2020, 27(1): 122–125.  
JIA Jianchao, LIAO Hualin, YU Huaibin, et al. Study on flow field characteristics of hydraulic jet radial drill[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(1): 122–125.
- [ 29 ] 光新军, 王敏生, 皮光林. 超高压水射流钻井技术现状及发展建议 [J]. 钻采工艺, 2017, 40(1): 37–40.  
GUANG Xinjun, WANG Minsheng, PI Guanglin. Status and development suggestion for high-pressure water jet drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(1): 37–40.
- [ 30 ] 聂臻, 于凡, 黄根炉, 等. 伊拉克 H 油田 Sadi 油藏鱼骨井井眼布置方案研究 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 46–53.  
NIE Zhen, YU Fan, HUANG Genlu, et al. Wellbore arrangement schemes for fishbone wells in the Sadi Reservoir of the H Oilfield in Iraq[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1): 46–53.
- [ 31 ] 杨睿月. 煤层气鱼骨井钻完井一体化方法研究与产能预测 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.  
YANG Ruiyue. Complementary fishbones jet drilling and production optimization in coalbed methane reservoirs[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2017.
- [ 32 ] 杨传书, 李昌盛, 孙旭东, 等. 人工智能钻井技术研究方法及其实 践 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 7–13.  
YANG Chuanshu, LI Changsheng, SUN Xudong, et al. Research method and practice of artificial intelligence drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5): 7–13.
- [ 33 ] 李根生, 宋先知, 田守嵘. 智能钻井技术研究现状及发展趋势 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 1–8.  
LI Gensheng, SONG Xianzhi, TIAN Shoucong. Intelligent drilling technology research status and development trends[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1): 1–8.
- [ 34 ] ZBOROWSKI M. How ConocoPhillips solved its big data problem [J]. Journal of Petroleum Technology, 2018, 70(7): 21–26.
- [ 35 ] Schlumberger Company. Cognitive technology in DELFI[EB/OL]. [2022-02-17].<https://www.software.slb.com/delfi/cognitive>.
- [ 36 ] Globes. Fieldbit's smart glasses prevent oil spills[EB/OL]. (2019-07-02)[2022-02-17].<https://pubs.spe.org/en/dsde/dsde-article-detail-page/?art=5674>.
- [ 37 ] JPT Staff. Sensabot: a safe and cost-effective inspection solution[J]. Journal of Petroleum Technology, 2012, 64(10): 32–34.
- [ 38 ] Saudi Arabian Oil Company. Saudi Aramco recognized as a leader in the Fourth Industrial Revolution[EB/OL]. (2019 -01-21)[2022-02-17].<https://www.saudiaramco.com/en/news-media/news/2019/gas-plant-recognized-as-a-factory-of-the-future>.
- [ 39 ] 赵福豪, 黄维安, 雍锐, 等. 地质工程一体化研究与应用现状 [J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(2): 131–138.  
ZHAO Fuhao, HUANG Weian, YONG Rui, et al. Research and application status of geology-engineering integration[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2): 131–138.
- [ 40 ] 何利, 肖阳, 孙宜成, 等. 车 21 井区裂缝性油藏地质建模与工程设计一体化研究 [J]. 特种油气藏, 2021, 28(1): 23–29.  
HE Li, XIAO Yang, SUN Yicheng, et al. On integration of geological modeling and engineering design of fractured oil reservoirs in Well Block Che21[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(1): 23–29.
- [ 41 ] 章敬. 非常规油藏地质工程一体化效益开发实践: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油为例 [J]. 断块油气田, 2021, 28(2): 151–155.  
ZHANG Jing. Effective development practices of geology-engineering integration on unconventional oil reservoirs: taking Lucaogou Formation shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin for example[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(2): 151–155.
- [ 42 ] 何光伟. 长庆致密油气藏工厂化井组快速钻井技术集成与规模化应用研究 [D]. 西安: 西北大学, 2018.  
HE Guangwei. Research on integration and scale application of rapid drilling technology for factory well group in Changqing dense oil and gas[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.

[ 编辑 陈会年 ]