石油钻探技术
PETROLEUM DRILLING TECHNIQUES
中国科学引文数据库（CSCD）来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》（CA）收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》（AJ）收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊（美）
AAPG协会期刊出版平台收录期刊（美）
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

油气井钻完井作业碳减排发展方向与建议

王敏生

Development Direction and Suggestions for Carbon EmissionReduction during Drilling and Completion

WANG Minsheng

在线阅读 View online: http://doi.org/10.11911/syztjs.2022106

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国地下储气库钻井完井技术现状与发展建议

Current Status and Development Suggestions in Drilling and Completion Technology of Underground Gas Storage in China

石油钻探技术. 2020, 48(3): 1–7 http://doi.org/10.11911/syztjs.2020041

中国石化重点探区钻井完井技术新进展与发展建议

New Progress and Development Suggestions for Drilling and Completion Technologies in Sinopec Key Exploration Areas

石油钻探技术. 2020, 48(4): 11–20 http://doi.org/10.11911/syztjs.2020069

页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向

Key Drilling/Completion Technologies and Development Trends in the Efficient Development of Shale Oil

石油钻探技术. 2019, 47(5): 1–10 http://doi.org/10.11911/syztjs.2019076

致密/页岩油气储层损害机理与保护技术研究进展及发展建议

Research Progress and Development Recommendations Covering Damage Mechanisms and Protection Technologies for Tight/Shale Oil and Gas Reservoirs

石油钻探技术. 2020, 48(4): 1–10 http://doi.org/10.11911/syztjs.2020068

低渗透油气藏高效开发钻完井技术研究主要进展

Key Achievement of Drilling & Completion Technologies for the Efficient Development of Low Permeability Oil and Gas Reservoirs

石油钻探技术. 2019, 47(1): 1–7 http://doi.org/10.11911/syztjs.2019027

中国石化海外油气田钻井完井技术现状与发展建议

Drilling Completion Technologies of Sinopec Overseas Oilfields: Status Quo of Technology Development Suggestions

石油钻探技术. 2018, 46(5): 1–7 http://doi.org/10.11911/syztjs.2018128

扫码关注公众号，获取更多信息！

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2022106

引用格式：王敏生. 油气井钻完井作业碳减排发展方向与建议 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 1-6.
WANG Minsheng. Development direction and suggestions for carbon emission reduction during drilling and completion [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 1-6.

油气井钻完井作业碳减排发展方向与建议

王敏生

（中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206）

摘　要: 钻完井作为油气勘探开发中主要的碳排放阶段，是实现净零排放的重要环节。总结了油气全产业链碳排放足迹及主要油田技术服务公司碳减排的动向，分析了钻完井作业碳减排的发展方向，认为其主要包括升级改造钻机与压裂泵车动力系统、提升装备动力管理自动化水平、加大储能技术在钻完井中的应用力度、推广钻完井自动化与远程决策系统、探索钻完井作业与海洋新能源耦合等，结合国家和油气企业碳达峰、碳中和目标以及钻完井技术水平，提出了实现钻完井作业过程碳减排的建议，即聚焦油气勘探开发碳排放足迹，强化钻完井全过程碳排放管理、推进钻完井全过程低碳化转型、提升钻完井作业效率、探索海洋新能源利用。研究结果与建议对加快推进钻完井作业过程碳减排、实现我国低碳转型承诺具有重要意义。

关键词: 钻井；完井；碳减排；储能；远程作业；海洋风能；发展方向；发展建议

中图分类号: X24　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1001–0890(2022)06–0001–06

Development Direction and Suggestions for Carbon Emission Reduction during Drilling and Completion

WANG Minsheng

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

Abstract: As the main carbon emission stage of oil & gas exploration and development, drilling and completion are important fields for achieving net zero emission. In this paper, the carbon emission footprint of the whole oil & gas industry chain and the trend of mitigating carbon emission of major oil service companies were summarized, and the development direction for carbon emission reduction during drilling and completion was analyzed. Specifically, it is necessary to upgrade the power system of drilling rigs and fracturing pump trucks, improve the automation level of equipment power management, strengthen the application of energy storage technology in drilling and completion, promote automatic drilling and completion and remote decision-making systems, and explore the coupling between drilling and completion and marine new energy,etc. Then, suggestions for carbon emission reduction during drilling and completion were proposed based on the carbon peak and carbon neutralization targets of China and oil & gas enterprises, as well as the technical level of drilling and completion. The suggestions include focusing on the carbon emission footprint of oil & gas exploration and development, strengthening the carbon emission management and promoting the low-carbon transformation during the whole drilling and completion process, improving the efficiency of drilling and completion, and exploring the utilization of marine new energy. As a result, these suggestions are of great significance to accelerate the carbon emission reduction of drilling and completion and meet China's commitment to low-carbon transformation.

Key words: drilling; completion; carbon emission reduction; energy storage; remote operation; ocean wind energy; development direction; development suggestion

气候变化是当前社会面临的最为严峻的挑战之一，给人类的生存与发展带来了严重的威胁。发展低碳经济是减少温室气体排放、应对气候变化的有效途径。为兑现巴黎协定的承诺，各国都在密集推进碳减排行动，截至 2021 年底，全球已有 136 个国家提出了“碳中和”承诺，这一范围覆盖了全球

收稿日期: 2022-08-25; **改回日期:** 2022-09-29。

作者简介: 王敏生（1973—），男，河南信阳人，1995 年毕业于江汉石油学院钻井工程专业，2009 年获中国石油大学（华东）油气井工程专业博士学位，正高级工程师，主要从事油气井工程及石油工程战略规划方面的研究与管理工作。系本刊主编。E-mail: wangms.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“面向 2035 年的油气开发工程前沿技术战略研究”（编号: P20031）资助。

88% 的二氧化碳排放、90% 的 GDP 和 85% 的人口。油气作为传统化石能源，向低碳转型也成为必然趋势[1–4]。钻完井作为油气勘探开发中主要的碳排放阶段，是实现净零排放的重要环节。近年来，各油田技术服务公司不断加大钻完井作业过程低排放装备与技术的研发与应用，通过升级改造钻机与压裂泵车燃料系统、提升装备动力管理自动化水平、推广钻完井远程决策系统、加大储能技术的应用、探索与新能源耦合等一系列技术措施，显著降低了油气勘探开发过程中碳排放的强度。我国油气勘探开发正处在绿色转型与高质量发展的关键期，分析钻完井作业过程碳减排动向及进展，提出钻完井过程碳减排方向与建议，对我国油气公司探索钻完井碳减排路径具有重要意义。

1　油气开发碳排放源与油田技术服务公司碳减排动向

据国际能源署（IEA）统计数据，2021 年全球二氧化碳排放量为 330×10^8 t，主要来源于煤、石油和天然气等一次能源的使用。油气行业全价值链从开采、运输、储存到终端应用产生的碳排放量达到全球总碳排放量的 42%，其中，油气勘探开发、储运、炼制等生产阶段的碳排放量占 9%，油气使用阶段的碳排放量占 33%。油气行业生产阶段的碳排放主要包括二氧化碳和甲烷，二氧化碳排放主要由供热与供能需求产生，如油气全产业链生产过程使用石油天然气作为燃料供能、供热和发电等带来的尾气排放。甲烷的排放主要来源于生产过程中天然气的不完全燃烧及逃逸等。图 1 所示为油气全产业链生产阶段碳排放来源[5]。从图 1 可以看出，在油气生产产业链排放的温室气体中，甲烷占 57%，二氧化碳占 43%，其中上游钻完井与生产过程中的二氧化碳排放约占 10%，是实现净零排放的重要阶段。

作为全球向低碳经济转型的关键参与者，各油田技术服务公司制定了碳减排中长期发展战略，制定了减排目标，并加大了提高能源利用率、新能源领域、碳捕获与封存（CCS）等方面技术的研发力度，以减少温室气体排放，努力实现碳中和。表 1 为部分油田技术服务公司碳减排目标与技术布局[6–10]。油田技术服务公司碳减排措施取决于技术水平、资产组合和区域条件与政策等因素。其中，技术服务公司侧重电动装备、排放监测管理系统、自动化与远程决策等钻完井过程中的碳减排，以及 CCS、地热、氢能、储能等新领域的减排。钻井承包商注重提高钻完井过程中的能源利用率，通过改造升级钻机动力系统，采用双燃料、天然气、网电、锂电池–柴油混合动力、燃料电池、储能等减少柴油的使用量，同时利用大数据动态监测分析软件和钻机动力系统管理软件实现碳排放监测和动力管理。

2　钻完井作业碳减排发展方向

2.1　升级改造钻机与压裂泵车动力系统，实现对柴油的替代

通过改变钻完井装备动力方式，采用双燃料发

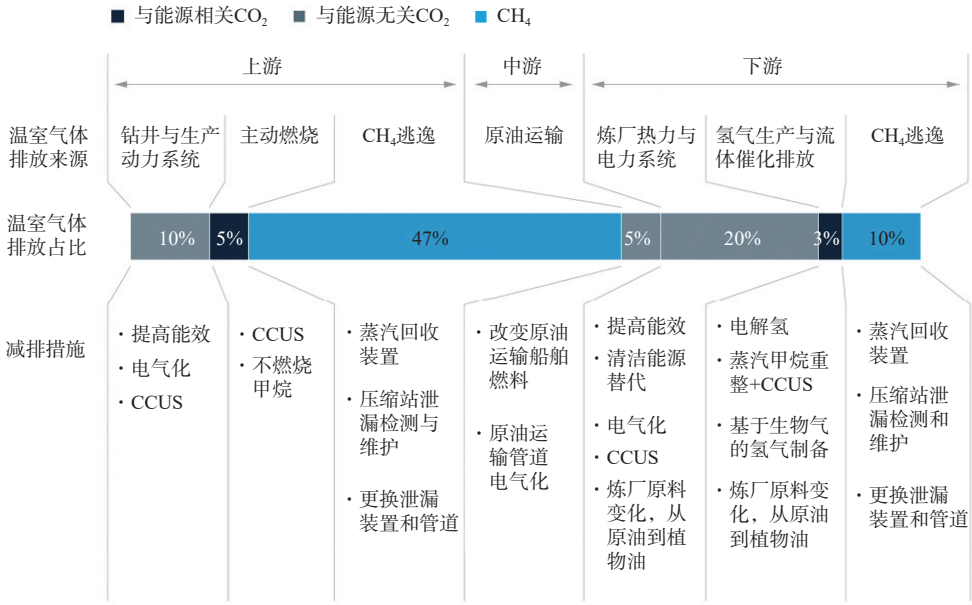

图 1　油气全产业链生产阶段碳排放来源

Fig.1　Sources of carbon emissions in the whole oil & gas industry chain

表 1　部分油田技术服务公司碳减排目标与技术布局

Table 1　Carbon emission reduction goals and technological layout of some oil service companies

公司		碳减排目标	技术布局
技术服务公司	斯伦贝谢	2025年前 Scope1和 Scope2减少 30%, 2030年前Scope1和Scope2减少50%, Scope3减少30%, 2050年实现净零排放	钻机自动化动力管理系统、远程作业；通过合资合作、风险投资等方式推进CCS、地热、地源热泵、氢能和锂电池等领域技术快速发展
	贝克休斯	2030 年前碳排放减少 30%, 2050年前实现净零排放	双燃料压裂泵、碳排放监测与管理、自动化智能化解决方案；氢能/锂电池、CCS、地热、生物质能和储能等新能源新领域技术
钻井承包商	Patterson-UTI	致力于作业过程中减少碳排放量, 使用创新的燃料解决方案	双燃料/天然气钻完井装备、锂电池储能、钻机自动化动力管理系统、远程作业和碳排放监测等
	H & P	通过优化钻机能源利用效率和提升钻井效率, 2018年以来, Scope1减少23%, Scope2减少17%	双燃料 / 天然气/网电钻完井装备、钻机动力管理系统、飞轮和锂电池储能等
	Nabors	利用智能化、可持续解决方案实现碳减排, 2016年以来单位进尺碳排放量减少30%	钻机排放监测、双燃料钻完井装备、电力解决方案、混合动力管理系统、锂电池储能和钻井自动化技术等
	挪威Odfjell钻井公司	2025 年碳排放量减少 40%, 2050年实现净零排放	钻机动力管理系统、飞轮及电池储能和海洋风电等
	丹麦Maersk钻井公司	到2030年将钻井作业产生的二氧化碳排放强度降低50%	钻机动力管理系统、尾气处理和高温甲醇电池等

注：scope1为企业内部直接的碳排放；scope2为企业外购电力和蒸汽生产过程中的碳排放；scope3为原料供应链生产过程中的碳排放。

电机组、天然气发电机组和网电机组等替代柴油发电机组，降低柴油使用量，大幅减少井场二氧化碳和氮氧化合物的排放[11–15]。双燃料发电机组可以使柴油用量降低 30%，天然气钻机的发电机组以天然气为燃料，不需要使用柴油，可以直接使用矿场天然气，减少了油罐车运送柴油产生的碳排放。美国的钻井承包商 Patterson-UTI 钻井公司有 60 台双燃料钻机和 11 台天然气钻机，占在用钻机总数的 61%；2013—2020 年采用双燃料压裂泵车完成了 17 000 级压裂作业，柴油消耗量减少了 4.37×10^4 t[16]。随着美国政府环境监管力度持续加大，北美油田技术服务公司纷纷加快了“电代油”的步伐，加速电驱设备布局。哈里伯顿公司研发的全电动压裂系统输出功率高达 3 677.49 kW，配套的天然气发电系统可以实时跟踪和分析压裂作业过程中的碳排放强度，从而能够最大限度地提高燃料利用率、减少碳排放量，如马塞勒斯区块使用了 25 MW 的电能，污染物排放量减少了 32%。

2.2　提升装备动力管理自动化水平，优化发电机组运行效率

直流电驱钻完井装备发电机组的启动和关闭通常由现场人员手动操作，在钻机低负载条件下，发电机组使用数量与实际需求不一致，导致发电机组利用率低，增加了燃油的消耗量和温室气体的排放量。美国 H & P 公司开发的钻机动力自动化管理系统可以自动计算不同钻机负载下所需最优柴油发电机组数量，当钻机长时间在低载荷运行时，系统自动关闭多余的发电机组；当钻机在高负载运行时，系统自动开启备用发电机组，以满足不同工况对动力的需求，提升了发电机组在任何燃料下的运行效率，减少了二氧化碳和氮氧化物的排放量。钻机动力自动化管理系统使燃料消耗量减少了 5%，二氧化碳和氮氧化合物排放量大幅降低。2018—2021 年，通过优化钻井作业工序，强化节油和减排目标，单位钻井进尺的二氧化碳平均排放量从 66 t/km 降至 59 t/km，降幅达 11%[17]。美国 Cactus 钻井公司与斯伦贝谢公司合作，利用钻机动力自动管理系统使发电机使用时间缩短 20%，燃料消耗量和碳排放量减少 10%。

2.3　加大储能技术在钻完井中的应用力度，实现机组调峰补偿

钻井作业不同阶段对动力的需求波动较大，造成柴油发电机组能量转换率较低。利用锂电池、飞轮、氢气储能技术和混合动力管理系统，可以优化钻机柴油发电机组配置数量，缩短柴油发电机组运行时间，减少燃料消耗量和碳排放量[18–20]。Patterson-UTI 钻井公司利用锂电池存储和分配钻井作业所需能量，当钻井作业所需能量低于发动机组能量时，将多余的能量存储于锂电池；反之，锂电池为钻机提供部分动力，实现发电机组调峰补偿，减少柴油发电机组使用数量。该系统可以存储 500 kW·h 的电能，提供相当于 1.5 台柴油发电机满负荷运转 0.5 h 的电力。双柴油发电机组+锂电池混合动力钻机通过锂电池储能技术提供动力，并在作业过程中为锂电池充电（见图 2），比传统钻机减少 1 台柴油机的使用[21]。锂电池储能系统除了节省燃料外，还可避

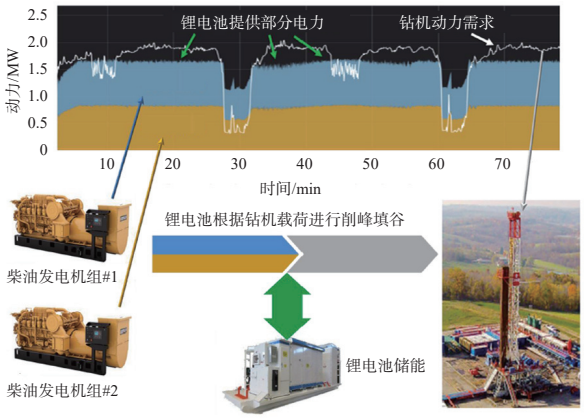

图 2　双柴油发电机组+锂电池混合动力钻机

Fig.2　Hybrid drilling rig with dual-diesel generating set and lithium battery

免因发电机故障导致的停机。西门子能源公司在海洋钻机上应用锂电池储能技术，使 1 个柴油发电机组的运行时间缩短了 42%，二氧化碳和氮氧化合物的排放量分别减少了 15% 和 12%。钻机绞车和平台吊车悬挂重物下降过程中的重力势能一般通过刹车片产生的热能耗散，美国国民油井公司开发了钻机动能回收系统，将该部分重力势能转换为飞轮高速旋转的动能，飞轮质量达 15 t，最高可吸收功率高达 1.75 MW 的能量，由于飞轮储能时间只有 6～10 s，将其旋转动能给容量 450 kW·h 的锂离子电池系统充电，锂电池组通过钻机微电网为钻机提供一部分动力，从而减少运行柴油发电机组的数量和缩短运行时间[22]。斯伦贝谢公司与氢燃料电池制造商 Hyzon Motors 合作开发氢燃料电池系统，计划 2023 年在美国陆地钻机上进行测试。1 台完全由氢燃料电池系统提供动力的钻机，预计每年二氧化碳排放量可以减少 10 000 t。

2.4　大力推广钻完井自动化与远程决策系统，缩短建井周期、减少现场人员

利用先进的自动化与远程决策系统，提高井场作业的自动化和远程操作能力，可缩短建井周期、减少前往井场的人员和车辆，从而减少碳排放量。新冠肺炎疫情爆发期间，远程作业因其在减少员工接触和出差、减少碳足迹方面的优势，成为了油田技术服务领域工作的新常态。随着远程决策系统的不断迭代升级，远程作业范围已由随钻测量（MWD）和随钻测井（LWD）服务推广到远程控制高效定向钻井，以旋转导向钻井工具和螺杆钻具为基础，通过随钻测井工具实时采集井下数据，传输至地面和后方远程控制中心，经过地质导向综合团队分析决策后，再将指令传送至井场和井下工具，实现闭环双向控制和井场与远程控制中心的协同作业[23–25]。Noble Energy 公司在北美页岩区块采用远程定向钻井技术，创造了日进尺 3 133.00 m 的纪录。2020 年，贝克休斯公司在 30 多个国家提供了远程服务，有 72% 的钻井作业、100% 的 MWD/LWD 和定向钻井由远程作业中心完成，还完成了历史上最大的一次远程操作部署，为沙特阿美石油公司建立了满足 2 000 多个最终用户和全天候钻井作业需要的远程决策系统。Patterson-UTI 钻井公司在 69 个井场提供了远程随钻测量服务（MWD），井场 MWD 人员减少了 50%，在某些情况下，甚至可以在没有任何 MWD 人员的情况下进行 MWD 服务。

2.5　积极探索钻完井作业与海洋新能源耦合，提升能源利用率

作为全球向净零排放经济转型的关键参与者，海洋油气技术服务公司不断加大低碳技术装备研制力度，以减少钻完井作业中温室气体的排放量。在围绕自身油气业务减碳的同时，海洋油气与新能源技术进行耦合成为未来低碳转型的主要趋势，图 3 为海洋钻完井与新能源耦合场景[19, 26]。挪威 Odfjell Drilling 海洋钻井公司正与西门子能源有限公司合作，利用海上浮式风电系统为钻井平台提供动力，其核心由风力涡轮发电机组和海上浮式电网系统组成。每台风力发电机最大可提供 14 MW 的电力，但是由于风电具有间歇性的缺点，需要在浮式风电单元安装电池储能系统，以确保在风电不足的天气下保障钻机的电力供应。英国 Cerulean Winds 公司提出利用浮式风能、氢气储能方案，加速英国大陆架海上石油和天然气资产的脱碳。项目计划耗资 100 亿英镑在谢德兰以西和北海中部安装 200 台风力发电机，总容量为 3 GW/h，在为海上油气生产设施提供绿电的同时，还可为陆上绿色氢电厂提供超

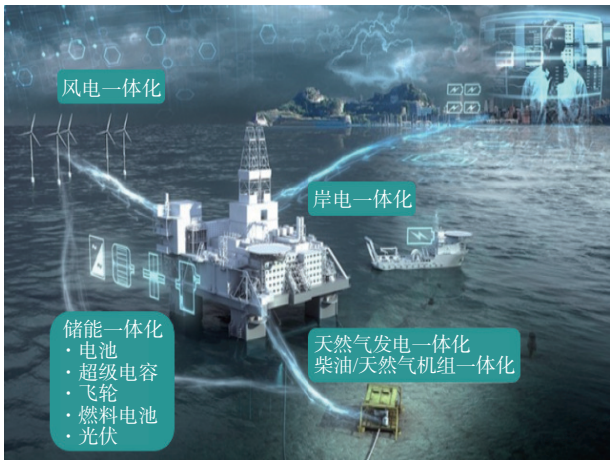

图 3　海洋钻完井与新能源耦合

Fig.3　Coupling scenario of offshore drilling and completion with new energy

过 1.5 GW/h 的电力，可以减少 2 000×10^4 t 二氧化碳排放，计划于 2024 年实现商业化[27]。海洋工程服务公司 Technip FMC 正在挪威建设和测试新一代离岸风电系统，当风电过剩时，在浮式平台上利用多余电力对过滤后的海水进行电解制氢，将绿氢输送并储存于位于海床的高压储能容器内；当风电不足时，利用燃料电池将氢气转化为电力，用于海上风电的调峰填谷。

3　启示与建议

3.1　启　示

1）钻完井作业过程碳减排已成为油田技术服务行业发展的新竞技场。在能源转型和低碳目标背景下，油田技术服务公司都制定了减排目标，加大了钻完井作业过程低碳技术的投入并进行布局，通过升级改造作业装备动力系统、推广数字化技术和与新能源公司合作提升电气化水平等途径，快速提升绿色低碳业务水平，以践行低碳转型的承诺。

2）技术水平和政策决定了油田技术服务公司的碳减排布局与策略。钻完井过程碳减排还处于前期探索阶段，还没有统一的解决方案，油田技术服务公司根据自身技术水平、经济性和区域政策，多措并举，推动碳减排。技术服务公司侧重通过电动装备、储能技术研发和数字化技术提升作业效率，钻井承包商侧重通过钻完井装备动力系统的改造升级、钻机动力系统管理软件研发等提升能源利用率。

3）自动化智能化技术是实现净零排放的重要手段。自动化智能化技术可以提高作业效率，缩短建井周期，借助远程决策系统还可以减少现场作业人员和后勤保障，是减少碳排放、实现净零排放的重要措施。国外油田技术服务公司不断加大自动化智能化钻完井技术迭代升级与推广力度，通过远程决策系统实现了随钻测量、随钻测井、定向钻井等钻井远程决策与操控，并形成了独有的技术和商业服务模式。

4）海洋油气与新能源技术进行耦合成为未来低碳转型的主要趋势。在能源转型和碳减排的推动下，越来越多的传统海上油气开采企业围绕自身油气业务减碳的同时，通过合资合作将海洋油气与新能源技术进行耦合。协同发展海洋油气与海上风电，不仅可以降低海上电力输送成本，还能减少油气勘探开发二氧化碳的排放。此外，未来海洋油气与海上风电还可以在天然气发电、二氧化碳存储和氢气生产等领域发挥协同互补作用。

3.2　建　议

我国提出力争在 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。油气勘探开发作为重要的碳排放源，直接影响到整体碳达峰和碳中和目标的实现。钻完井作业过程碳减排是油气上游实现碳减排的重要方向，建议我国石油公司加强钻完井作业过程中碳排放的管理和节能减排技术的研发与应用，以实现对低碳转型的承诺。

1）强化钻完井全过程中碳排放的管理。为确保碳减排措施的有效性，要明确碳排放核算及分析方法，形成碳核算和报告的机制。以碳核算为基础，实行钻完井全过程碳排放管理，建立并实施科学统一的碳减排统计指标体系和监测体系，强化对碳排放重点环节的指导和监管，确定碳减排目标，并建立评价考核制度，以确保责任清晰、措施到位。

2）推进钻完井全过程低碳化转型。要根据自身技术水平和井场工业设施条件，多管齐下，减少碳排放。一方面注重作业装备动力系统改造升级，采用双燃料、天然气、网电、锂电池+柴油混合动力机组，减少柴油的消耗量；另一方面利用作业装备大数据动态监测分析软件、自动化动力系统管理软件和储能技术提高能源利用率。

3）提升钻完井作业效率。作为油气勘探开发的重要环节，钻完井的碳减排需要与施工效率的提升相结合，强化优快钻完井技术的研究与应用，不断提升钻完井智能化、自动化水平，推广远程决策系统，不断提高作业效率，缩短钻井周期，以低碳方式实现快速钻完井，降低油气生产中的碳排放强度。

4）探索钻完井作业与海洋新能源技术耦合。全球海上风电资源丰富，海上风电开发和海上油气开采又有着相似的供应链和技术要求，油气行业的技术和安全标准可高度移植。充分利用海洋油气作业技术，开展海洋风电开发关键技术攻关，快速进入海上风电领域。同时，将海洋油气开发与海上风电、天然气发电、电解水制氢等进行一体化协同。

4　结束语

全球应对气候变化行动正在对油气行业产生广泛而深刻的影响，油气井钻完井低碳转型与加大碳减排力度也成为必然趋势。钻完井作业过程碳减排总体还处于初期阶段，尚无统一的解决方案，升级改造钻机与压裂泵车动力系统、提升装备动力管理自动化水平、加大储能技术在钻完井中的应用、推广钻完井自动化与远程决策系统、探索钻完井作业

与海洋新能源技术耦合是碳减排的重要方向。我国油气公司要根据区域政策、自身技术水平、经济性，多措并举，强化钻完井全过程碳排放监测与管理，推动低碳高效工程技术的研发与应用，加快钻完井作业数字化转型，加强与新能源企业的合作，不断提升低碳运营能力，以经济高效的方式实现低碳发展，支撑油气绿色低成本开发利用。

致谢：论文撰写过程中，中石化石油工程技术研究院有限公司光新军博士、闫娜博士帮助完成了资料收集工作，在此表示感谢！

参　考　文　献

References

[1] 邹才能，熊波，薛华庆，等. 新能源在碳中和中的地位与作用 [J]. 石油勘探与开发，2021，48(2)：411–420.
ZOU Caineng, XIONG Bo, XUE Huaqing, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 411–420.

[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] 刘殊呈，粟科华，李伟，等. 油气上游业务温室气体排放现状与碳中和路径分析 [J]. 国际石油经济，2021，29(11)：22–33.
LIU Shucheng, SU Kehua, LI Wei, et al. Greenhouse gas emission status of oil and gas upstream business and analysis on carbon neutrality path[J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(11): 22–33.

[4] BP. Statistical review of world energy[EB/OL]. [2021-10-18]. https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html.

[5] BECK C, RASHIDBEIGI S, ROELOFSEN O, et al. The future is now: how oil and gas companies can decarbonize[EB/OL]. (2020-01-07)[2021-10-18]. https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-future-is-now-how-oil-and-gas-companies-can-decarbonize.

[6] 曾涛，袁园. 斯伦贝谢公司适应能源转型的措施与启示 [J]. 国际石油经济，2022，30(3)：36–43.
ZENG Tao, YUAN Yuan. Schlumberger's measures adapting to energy transition and related inspiration[J]. International Petroleum Economics, 2022, 30(3): 36–43.

[7] 丁根. 国际油服公司碳捕集、利用与封存业务的现状与展望 [J]. 世界石油工业，2022，29(4)：28–33.
DING Gen. Current situation and prospects of carbon capture, utilization and sequestration business of international oilfield services companies[J]. World Petroleum Industry, 2022, 29(4): 28–33.

[8] MCCULLOUGH D. Decarbonizing with digital: Improving drilling and well construction performance, sustainably[EB/OL]. (2021-09-24)[2021-10-18]. https://www.worldoil.com/magazine/2021/september-2021/features/decarbonizing-with-digital-improving-drilling-and-well-construction-performance-sustainably.

[9] Baker Hughes. Our strategy[EB/OL]. [2022-05-31]. https://www.bakerhughes.com/company/2021-digitalannual-report/our-strategy.

[10] BAKER HUGHES. Carbon capture, utilization and storage policy statement[EB/OL]. (2021-01-15) [2022-05-31]. https://www.bakerhughes.com/sites/bakerhughes/files/2021－03/2021－01%20Baker%20Hughes%20CCUS%20Policy%20-%20Final%20-%2001152021_0.pdf.

[11] EYGUN C, BELGAROUI J, WU Yang, et al. Mitigating shale gas developments carbon footprint: evaluating and implementing solutions in argentina[R]. URTEC 2687987, 2017.

[12] SEYBOLD E, GOSWICK S, KING G E, et al. Evolution of dual fuel pressure pumping for fracturing: methods, economics, field trial results and improvements in availability of fuel[R]. SPE 166443, 2013.

[13] FEDER J. E-fleet: electric-powered fleets herald a new future, but it won't happen overnight[J]. Journal of Petroleum Technology, 2021, 73(10): 23–26.

[14] OEHRING J M. Environmental benefits of electric powered hydraulic fracturing[R]. SPE 177308, 2015.

[15] HOPKINS D, FOX I, MOLEN D. Gas powered engines with energy storage-a game changer in land drilling[R]. SPE 199671, 2020.

[16] PATTERSON-UTI. Air quality, greenhouse gas emissions reduction and energy efficiency[EB/OL]. [2022 -05-31]. https://esg.patenergy.com/Environmental/Air-Quality-Emissions-and-Energy/.

[17] WHITFIELD S. Automation-enabled fuel efficiency leads onshore drilling ESG[J]. Drilling Contractor, 2021, 77(5): 20–25.

[18] VERHOEF R. Solutions for reduced carbon emissions and advances in power generation[R]. IPTC 22539, 2022.

[19] SETTEMSDAL S. Applications of lithium-ion batteries in offshore oil & gas: The journey to building a low-emissions drilling rig[R]. OTC 30923, 2021.

[20] WHITFIELD S. Zero-emission power-generation system in development for land rigs using hydrogen fuel cells[J]. Drilling Contractor, 2022, 78(5): 20–21.

[21] BILGIN M, DONEN J, SCAINI V, et al. World's first hybrid drilling rig[R]. SPE 199573, 2020.

[22] WHITFIELD S. 'Green' innovations flourish amid drive for lower emissions[J]. Drilling Contractor, 2021, 77(5): 12–19.

[23] YATES M R, BRAHIM I B, ALNOFAILY S M, et al. Sustaining remote operations adoption post pandemic: A major key to a net zero future[R]. SPE 205440, 2021.

[24] MATHUR R K, MACPHERSON J, KRUEGER S, et al. A step change in drilling efficiency using remote operations[R]. OTC 30890, 2020.

[25] 闫娜，李庆. 贝克休斯远程作业发展历程及启示 [J]. 石油科技论坛，2021，40(5)：79–84.
YAN Na, LI Qing. Development process and enlightenment of Baker Hughes remote services[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(5): 79–84.

[26] SETTEMSDAL S O. Applying energy storage solutions ESS in offshore oil and gas to reduce emissions and costs[R]. SPE 195777, 2019.

[27] Anon. Floating wind, hydrogen proposal aims to accelerate decarbonization of UK offshore oil and gas assets[J]. Drilling Contractor, 2021, 77(4): 13.

[编辑　刘文臣]