

在全球能源转型和“双碳”目标的大背景下，石油工程技术创新正朝着绿色化、低碳化方向加速迈进。传统油气勘探开发模式面临严峻挑战，同时也孕育着新的发展机遇。新一代石油工程绿色技术应运而生，以节能减排、降本

增效、环境友好为目标，为油气行业可持续发展注入新动能。

本文版图除署名外由 蒋琳琳 王海波 钱晓琳 肖京男
王磊 崔晓杰 程光明 吴晋霞 提供

新一代石油工程绿色技术 推动油气勘探开发迈向“零碳”未来

专家视点

□中国石油化工工程技术研究院
副院长、正高级工程师 王敏生

为应对全球气候变化，世界主要国家和地区均制定了碳中和减排目标。油气作为传统化石能源，绿色低碳转型与加大碳减排力度是实现可持续发展的必由之路。统计估算结果表明，与油气直接和间接相关的碳排放量占全球碳排放总量的40%以上，油气公司肩负减碳的重大社会责任。油气勘探开发作业作为油气行业重要的碳排放来源，碳减排实施效果直接影响整体碳达峰、碳中和目标的实现。

我国油气对外依存度不断攀升，2024年我国原油、天然气对外依存度分别超过70%和40%，油气安全面临严峻挑战。随着我国油气勘探开发不断深入，油气勘探开发对象向深层超深层、深水超深水、页岩油气、致密低渗、高含水老油田等复杂油气藏转变，呈现勘探开发对象复杂化和资源品质劣化趋势，油气规模增储和稳产难度越来越大。与此同时，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，我国提出在2030年前实现碳达峰，力争2060年前实现碳中和。在保障国家能源安全和实现净零排放的双重要求下，油气勘探开发既要实现整体经济效益提升，又要走好低碳发展之路。

石油工程投资约占油气上游投资的60%，石油工程技术及装备水平决定了可开采资源量及开采的经济性，也决定了油气资源的相对竞争力水平。目前，绿色低碳石油工程技术处于快速发展的蓄势期，仍面临整体成熟度低、产业链长、系统性不强、社会效益不足等难题和挑战，需全面启动相关“低碳”“零碳”“负碳”技术发展的全局性部署，加强绿色低碳石油工程技术基础理论和关键技术攻关，加大现场先导试验力度，制定低碳运营行业规则和技术标准，通过技术创新构建绿色、清洁、循环的石油工程技术体系，打造绿色低碳竞争力。

以石油工程节能减排与尾气利用技术创新推动油气“低碳”发展。强化油气勘探开发全过程的碳排放管控，是实现低碳发展的关键。在碳中和背景下，油气行业要重点做好石油工程领域的技术迭代升级，推动技术装备朝着电气化及低能耗绿色方向发展，实现施工作业过程节能高效，井筒工作液减量、循环重复利用和绿色清洁。一是大力推动钻机和压裂车以电代油、燃料清洁低碳化，研发推广风电钻机、混合动力钻机、燃料电池钻机等装备，提高工程技术装备电气化率，为钻井、压裂改造和完井作业等领域提供基于绿色能源的低碳技术和全套能源解决方案。二是对钻完井装备进行自动化改造，研发动力自动管理系统、能耗自动检测系统等，实现能源利用最大化。三是开展作业过程碳排放监测，生物聚合物、可降解井筒工作液、钻井液压裂液回收处理与利用，节能节水循环利用等研究，减少对环境和安全产生的影响，降低生产和运输过程中的碳排放。

以油气与新能源耦合技术创新推动油气“零碳”发展。全球能源转型将改变石油和天然气行业的格局，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，实现低成本的可再生能源与低成本的油气田资产共存。三是探索在油气开发工程作业过程中应用锂电池储能、氢能、飞轮储能系统等储能技术。

勘探开发需要发挥地热、风能、氢能、储能、太阳能等资源组合优势，实现多能互补、集成优化，以取得最合理的能源利用效果与效益，全面提升能源系统整体效率。一是将传统石油工程技术向新能源新领域移植，推动高含水地热和干热岩开发、氢能地下存储、压缩空气储能等新能源发展，充分利用废弃油气井转为地热和储能井筒，开展井筒完整性风险评估。二是充分利用海洋油气作业技术基础，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，实现低成本的可再生能源与低成本的油气田资产共存。三是探索在油气开发工程作业过程中应用锂电池储能、氢能、飞轮储能系统等储能技术。

以碳捕集、利用与封存技术创新推动油气“负碳”发展。碳捕集、利用与封存是未来油气绿色低碳发展趋势，也是大幅度提高油气采收率的重要手段，但还面临成本高、安全要求高、技术不成熟等挑战。一是要在综合考虑碳捕集工厂、运输管道、地质封存条件等因素的基础上，开展二氧化碳在埋存层位的运移规律，地层流体与地层相互作用机理，碳捕集、利用与封存层评价，注入与封存经济性评价，注入容量与注入时间长方案优选研究；二是要开展高效低成本钻完井技术、油套管的防腐技术、储层长期监测与解释技术、油气井二氧化碳风险评估研究，实现二氧化碳经济高效利用与存储，并确保盖层与井筒的长期完整性；三是开展二氧化碳混合压裂提高采收率技术、二氧化碳驱油提高采收率技术等研究，提高碳封存与利用的经济效益。



高性能水基钻井液助力
华东油气深井1-1S05HF井顺利
完钻。



高性能水基钻井液关键处理剂。

高性能水基钻井液

非常规油气开发的“绿色血液”

产品介绍

高性能水基钻井液是一种在非常规及复杂油气藏钻探时，可替代油基钻井液的环保型钻井液体系，具有强抑制、强封堵、高润滑特性，可有效提升井壁稳定性、降低摩阻，提高钻进效率。

相较于油基钻井液，高性能水基钻井液在环保方面优势明显，是“水替油”绿色环保开发的重要技术之一。

在西南页岩气区块，SM-ShaleMud高性能水基钻井液体系首次亮相，顺利完成了深层页岩气资源的钻探任务。在威页23平台，5口井施工均取得圆满成功，水平段超1500米，钻井液密度最高达2.2克/立方厘米，井壁稳定周期长达73天。其中，威页23-3HF井以17.29天完成龙马溪组页岩地层1680米段钻井施工，刷新了中国石化西南工区页岩气高性能水基钻井液应用的新纪录。

随后，面对华东页岩油区块更高的环保需求和低成本要求，研发团队不断优化升级，构建了SM-ShaleMud-II高性能水基钻井液体系，在沪页3-7HF井的首次试验中，该体系展现出卓越性能，创8项国内施工新纪录，并持续迭代升级为高性能水基钻井液体系SM-ShaleMud。

研发之路充满艰辛与挑战。面对复杂多变的地层条件和严苛的环保要求，工程院研发团队从基础理论研究入手，深入剖析水基钻井液的每一个细节，打造出真正符合市场需求的高性能水基钻井液技术。

为攻克难题，技术人员进行了无数次的实验室研究和现场试验。在高温、高盐等极端环境下，他们不断探索新材料和新技术，尝试各种配方组合，力求找到最佳解决方案。经过不懈努力，研发团队提出

防管柱震颤机构设计等多项技术难题，研制出适用于直径473.1毫米生产套管和直径339.7毫米注采管柱的可解封式压缩空气储能封隔器。

地面测试结果显示，该封隔器气密性密封压力达到21兆帕、锚定性能大于2000千牛，达到API 11D1标准的VO级性能要求。

“接下来，我们将继续完善该封隔器的制造与施工作业标准化工艺包，加快现场入井试验和应用效果评价，提升产品性能，助力绿色能源开发。”项目负责人崔晓杰说。

效果评价

中国石化石油工程技术研究院首席专家孙明光：伴随着新能源装机容量快速增长，绿色能源压力日益凸显，配网问题已成为影响新能源下一阶段规模化发展的关键问题之一。未来，压缩空气储能发展空间巨大，是能源绿色转型的重点方向之一。封隔器是发展压缩空气储能业务不可或缺的关键工具，研发过程中需要攻克超大截面尺寸、高频率交变载荷和高腐蚀性介质等技术挑战。与普通封隔器常用的胶筒中置或上置方式不同，工程院研发的直径473.1毫米生产套管和直径339.7毫米注采管柱可解封式压缩空气储能封隔器，全面优化形成胶筒下置的方式，提高了套管防护能力和工具耐腐蚀能力，创新的双级防退机构提高了轴向载荷锚定稳定性，技术指标具有先进性。在各类储能方式中，压缩空气储能与中国石化产业链协同性较强，要注重系统思维，坚持产品导向，形成全产业链竞争优势。



研发人员
对试验中的封
隔器进行细致
严密的检查测
量，保证试验充
分全面、结果可
靠。

效果评价

西南石油工程钻井工艺研究院专家周成华：高性能水基钻井液技术的成功研发和应用，是工程院在钻井液技术领域取得的一项重大成就。该技术不仅实现了环保与性能的完美融合，而且大幅降低了钻井成本，提高了施工效率。特别是在西南区块的应用实践，充分证明了该技术的可靠性和先进性。今后，随着技术不断推广和应用，高性能水基钻井液将为我国油气勘探开发作出更大的贡献。

导热水泥基材料

助力深层地热开发“取热不取水”

产品介绍

导热水泥基材料主要用于地热井固井作业，利用高效热传导粒子填充，在水泥石中形成导热通道，在井筒内可直接与地层接触，提升水泥石导热系数。与常规水泥石相比，导热水泥基材料具有导热系数高、热传导快的优点，能有效传递地层热量、提高井筒内流体换热效率，是实现“取热不取水”绿色环保开发的重要技术之一。

研发应用

地球是天然的“大火炉”，越往地心走，温度越高。随着公众环保意识的增强，地热能作为一种稳定可靠、绿色低碳的可再生能源，正逐渐成为全球能源转型的重要方向，深层地热资源高效开发也是中国石化新能源战略的重要领域。

“地热能的好处很多，但开发也面临许多难题。”工程院钻井研究中心经理陶谦介绍，现有成熟地热取暖技术的抽热回灌需要大量的水资源，易对环境造成影响。为解决这个难题，新星公司在西咸新区部署了U形地热连通井，联合工程院成立项目组，积极探索“取热不取水”绿色开发模式，利用井下流体热交换提取地热热量。

“U形对接井换热是一种闭式循环取热技术，但与地层直接接触的水泥环导热系数偏低，难以高效传导地层热量，直接影响了U形连通井取热效率。”项目专家王磊说。为提高井下换热效率，工程院从增强水泥石导热系数的角度入手，遴选出能与水泥颗粒具有良好界面相容性的导热材料，通过多次试验总结出高导热材料对水泥石导热性能及抗压性能的影响规律，并初步得到了以片层状HCC-C为关键材料的二组分和三组分高导热配方。

HCC-C的表面疏水材料特性，会导致水泥浆增黏、分散性降低及稠化时间缩短等问题。”项目负责人熊翠洲说。为此，项目组通过分析配套分散剂和降失水剂，最终构建了能满足现场应用需求的高导热水泥浆体系，实现了稠化时间在3.5~7小时可控，且水泥石导热性能在90摄氏度较常规水泥石提升了40%以上。随后，在研发过程中，项目组又发现



高导热水泥入井后固化形成的水泥石。

高导热水泥浆存在导热材料分散性不足、极限加量低等问题，制约了井下换热效率的进一步提高，且水泥浆流变性能仍有待提升。经过反复讨论，项目组提出通过对关键材料表面亲水改性提高分散程度的思路。

然而，片层状材料HCC-C的优异导热性结构一旦破坏，势必会影响材料导热性能。经过大量调研与探索，项目组利用温和的氯化条件，通过过氯化改性剂结构、浓度及pH值的精细控制，在保留材料导热性能的前提下，改善了材料表面水润湿性和水泥界面相容性，同时配套研发了与非极性材料官能团适配度更高的复合分散剂，实现了高导热材料在水泥浆中极限加量的提升，在90摄氏度地层条件下，水泥石导热性是常规水泥石的1.6倍以上。

“在中未来明U形地热连通井的技术试验中，水平段1000米采用了导热水泥固井，成功实现了连通井封固。数据表明，在流量60立方米/小时工况下，入口温度10摄氏度，出井最高温度48.7摄氏度，稳定温度22.7摄氏度，平均换热率952千瓦，效果良好。”工程院项目专家肖京南介绍。

效果评价

中石化绿源地热能开发有限公司陕西分公司副总经理邹彦荣：我们在西咸新区开展的地热开发井下高效换热技术试验，是中国石化落实“双碳”行动、破解城市清洁供热难题的重要探索。导热水泥基材料在中未来明U形地热连通井的成功应用，有力地保障了今后对地热资源的低影响开发和高效率利用，为进一步探索“取热不取水”地热高效技术、大力开发利用地热能增添了新利器。