

碳中和愿景下油气储运技术分析

李 峰 徐敬波 吴 晓（中国石油天然气股份有限公司西北销售分公司，青海 兰州 730070）

摘要：在碳中和背景下，我国的能源结构发生了巨大变革，油气储运相关工作也无可避免的受到影响，本文首先简述了碳中和的政策背景，从当前油气储运的低碳目标出发，详细探讨了油气储运技术的发展方向，并分析了油气运输技术的新介质形式，明确相关技术的原理与应用要求，帮助相关企业结合实际环境以及低碳需求，找到合适的储运技术，从而促进我国油气产业发展。

关键词：碳中和；油气储运；技术发展

近些年，在政策影响和能效提升的双重影响下，我国对油气资源的需求量在不断增加，进一步推动了油气行业的发展，但受油气资源自身特性影响，油气在储运过程中会出现明显的蒸发与损耗，针对此类问题，分析连接上游生产和下游消费的油气储运技术具有重要意义，可以在实现碳中和目标的同时，确保能源的安全和高效供应。

1 碳中和的政策背景

在国际背景上，联合国气象组织报告显示，近年来地球平均气温持续上升，导致世界各地极端天气事件愈发频繁，这些极端天气现象对人类社会和自然生态系统造成了巨大影响，而气温升高的主要原因在于温室气体产生过多，尤其是二氧化碳。因此，实现碳中和已经成为全球应对气候变化的重要举措，且实现碳中和已经成为全球共识，其执行效果和举措的有效性在现阶段尤为关键。

在国内，截至 2019 年，中国已经是全世界碳排放量最多的国家，碳排放量占全球碳排放量的 27.92%，我国碳排放量从建国初就开始缓慢增长，在 2000 后开始快速增长。因此在 2020 年，中国首次明确要采取更加有力的政策和措施，努力争取在 2060 年前实现碳中和^[1]。

2 碳中和愿景下油气储运技术的低碳目标

在油气储运过程中，从开采、运输到最终使用，每一个环节都会产生大量的二氧化碳及其他温室气体。为了实现碳中和，必须大幅降低这些排放。这不仅涉及到技术革新，还需要实施全新的管理和运营模式，这些都是实现碳中和的核心要求。同时在油气储运中，提高能源利用效率也是低碳目标之一，因为高效的能源利用不仅可以降低成本，还可以减少资源浪费。油气储运还需要实现结构性转型，也就是从化石能源转向使用可再生能源，要减少对传统油气资源的

依赖，还要积极探索和利用新的能源形式。

碳中和愿景下，油气储运技术需要进行创新，不仅要充分融合新兴技术，还需要实现数字化转型。在新兴技术融合中，电动化和节能装备的推广使用十分重要，可以提高系统的整体效能。数字化转型则是需要有效利用数字化平台，整合传统油气勘探开发业务，提高作业安全性和效率，减少碳排放。

3 碳中和愿景下油气储运技术的发展方向

3.1 石油储运相关技术方向

在碳中和背景下，石油储运不仅要关注传统的安全和效率问题，还需要融入低碳环保理念，因此技术创新成为了石油储运实现碳中和目标的关键驱动力，行业需要开发和应用更多低碳、高效的储运技术和管理手段，以适应新的环保法规和市场需求^[2]。

面对当前可再生能源比例持续上升的情况，石油储运行业需要调整业务战略，适应市场结构变化的同时，寻找新的发展机遇。例如，应用间歇运行流动保障技术，该技术实质是通过周期性地启动和停止管道输送，来减少不必要的持续运行时间，从而达到节能降耗的目的。即在不影响总体输送任务的前提下，合理设置运行和停运周期。间歇运行的原理在于利用管道系统的蓄能能力，通过优化调度策略，精准控制管道压力和流量，实现按需输送。而在停运期间，管道内的剩余压力和存油可以维持不同输送任务，减少泵机组的启动次数，从而降低电能消耗和设备磨损。而流动保障技术则是利用流变学与流动仿真，借助计算机模拟，对管道内的流动情况进行预测优化，确保石油在间歇运行状态下也能维持良好的流动性。温度场与流场的耦合是实现间歇运行流动保障的核心。通过模拟管道内外的温度变化和流动状态，对加热和保温措施进行优化，防止因温度过低导致凝管。这种耦合仿真有助于找到最佳的运行参数，确保石油管道运输

在节能和安全之间找到平衡点。

在碳中和愿景下，石油用途开始从能源转向生产原料，这就导致了成品油的消费量在不断降低，因此为了减少储运成本，石油企业常会在管道中输送不同种类的油品，为了进一步节能降碳，如何有效跟踪混油界面并优化管道运行成为核心问题。

混油跟踪的主要目的是确定混油段的位置，明确其分布浓度，以便合理安排调度计划和分输方案。准确的混油跟踪可以显著提高油品质量，并降低混油处理能耗。目前主要采用数据驱动方法以及物理信息神经网络来对混油段进行跟踪。数据驱动方法是通过分析管道长期运行积累的历史数据，对混油浓度变化进行预测。物理信息神经网络则是将数据驱动与物理机制相结合，通过分析混油运输的基本控制方程和初始边界条件，将模型预测结果限制在可行的物理空间内，进一步提高了预测准确性。

管道的优化运行旨在通过精细化管理来提高管道的运行效率，从而降低能耗和排放，在面对小批量、多品种和间歇输送的石油储运工作时，可以确保油品质量和供应可靠性。其中智能控制与管理是目前常见的优化运行技术，主要利用传感器和自动化控制系统，实时监测管道压力流量和温度等参数，实现对混油界面的精准控制。并通过智能算法，动态调整泵站的工作状态，优化管道的流动状态，减少能耗的碳排放。

3.2 天然气储运相关技术方向

天然气作为一种清洁的化石能源，在能源转型中具有重要的衔接作用。在碳中和背景下，天然气因其低碳特性，成为了替代煤炭等高碳能源的重要燃料。当前的天然气储运主要依赖于传统的压缩和液化技术，储运设施则包括管道和 LNG 接收站，我国的储运设施目前已初具规模，但大多未进行绿色升级。天然气的压缩、运输以及再气化过程都会排放大量的二氧化碳。因此优化运输与提高储存量成为天然气实现碳中和目标的重要途径^[3]。

目前我国已经意识到天然气在能源转型中的重要作用，开始大力发展与建设地下储气库，即在夏季用气低谷时储存大量天然气，而在冬季高峰时释放以满足需求，并且储气还能在突发事件中提供安全保障。截至 2023 年底，我国共拥有 29 座在役储气库，设计工作气量为 330 亿立方米，实际形成调峰能力 230 亿立方米，占天然气消费总量的比例约为 4.5%。与其他国家平均水平相比，储气能力稍显不足。我国的储

气库主要包括气藏型和盐穴型两种，其中气藏型储气库数量最多，占比 89.6%，工作气量占比 91.0%。代表有呼图壁和双 6 储气库，它们具有较大的储气规模和较强的调峰能力。而盐穴型占比相对较小，为 10.4%，但其建设和运营效果很好，展现出了较高的经济优势。

为满足日益增长的储气需求，我国正在从单一储气类型向多种类型共建的方向发展，目前正在将油藏和水层作为新的探索重点，以此来增加储气库的多样性，尽可能的提升调峰能力。并且为了减少大量单独建设所带来的高成本，储气库的大型化正在发展中，但同时由于我国地质条件复杂，也对建库技术提出了更高要求。目前储气库发展新模式主要有“三区带”模式以及协同建设两种。“三区带”通过划分“甜点注采区”、“外溢控制区”和“开采外围区”，实现了局部注采强化，可以提升整体协调运作效果，特别是在低渗透气藏条件下。协同建设主要是油藏气驱采油与储气库的协同建设，这种新模式可以提高原油采收率的同时形成有效的储气空间，通过注入天然气来驱替原油，实现双重效益提升。

在碳中和背景下，天然气的管网运输需要提高灵活性，即降低输送能耗、保障输送安全、提高输送质量。目前已经使用了多种新型工艺技术，来达成碳中和目标，如原油改性、新型隔离液、管道内涂层技术等，不仅能提高输送效率，还能增强管道的安全性和环保性。在此基础上加强信息化、智能化水平，实现管网的灵活调度，该管网优化技术主要基于管网上下游用户数量和个性化需求的不断增多，确保管网与其他能源网络实现协同互联，降低管理难度，通过大数据、人工智能等先进技术，实现管网的智能调度和优化运行。

3.3 净零排放相关技术方向

在碳中和愿景下，油气储运领域在净零排放方面也进行了重大革新，首先是减少甲烷泄漏和火炬燃放，主要使用先进的传感器和卫星监测技术定期检测管道、阀门和其他基础设施的甲烷泄漏，并迅速进行维修，例如，使用光学气体成像相机和无人机，搭配红外传感器来高效识别泄漏点。或是通过改进生产和储运过程，尽量减少或完全避免火炬燃放，采用再压缩技术将原本会燃烧的气体重新注入地下或进行回收利用。其次是电气化和低碳能源供应。电气化是采用可再生或低碳能源供电的电动机械代替传统的燃气轮机

和柴油发动机。或是使用氢燃料电池或氢气涡轮提供动力，特别是在大型设施运作和长途运输中，可以实现整个过程的无碳排放。最后是碳捕获、利用与存储。碳捕获是在排放源头安装碳捕获设施，使用化学或物理吸附法捕捉二氧化碳，然后将捕获的二氧化碳运输至合适的地点进行封存，如枯竭的油气田、深海盐水层等。在二氧化碳利用上，可以将二氧化碳注入油藏中，提高原油采收率。此外，还可使用新型材料与工艺，如耐腐蚀、高强度的新材料，以延长设备寿命并减少维护需求。再例如，纳米涂层和高性能合金，可以减少管道和设备的腐蚀风险。新工艺方面，可采用数字化和智能化技术提升运营效率，减少排放。例如，人工智能和大数据分析可以优化生产流程，提前预警故障，减少意外排放^[4]。

4 碳中和愿景下油气储运技术的新介质形式

4.1 二氧化碳封存输送

在碳中和背景下，减少二氧化碳排放成为油气储运工作中的紧迫任务。碳捕集、利用与封存技术（CCUS）则是实现这一目标的重要手段。CCUS技术由捕集、运输、利用和封存四个主要环节构成，每个环节涉及多种技术路径和方法。捕集技术主要包括燃烧前、燃烧中和燃烧后捕集，适用于不同的工业场景。例如，燃烧前捕集适合IGCC系统，而燃烧后捕集则广泛应用于火电和水泥行业。运输技术包括罐车、船舶和管道运输，均有一定的适用范围，需要进行经济性考量。利用技术分为化工、生物和地质利用，通过不同途径实现二氧化碳资源化。封存技术主要涉及咸水层和枯竭油气藏等地质构造，确保二氧化碳长期稳定储存。

二氧化碳的咸水层封存是指将二氧化碳注入地下富含盐水的多孔岩层中，这些岩层存在于各个地区，其封存潜力巨大，例如，我国的鄂尔多斯盆地已经进行了10万吨级的咸水层封存示范项目，展示了良好的封存效果。枯竭油气藏封存则是利用开采殆尽的油气田作为二氧化碳的存储库，这些油气藏具有完善的地质结构，可以有效防止二氧化碳泄漏，还能增强剩余资源的采收率。

管道运输是大规模二氧化碳运输的最佳选择，具有高效和经济的优势。根据运输状态不同，可分为气态、低温液态、密相和超临界输送。其中超临界输送因二氧化碳具有类似液体的密度和较低的粘度，较为常用。我国首条大规模二氧化碳管道（齐鲁石化—胜利油田CCUS示范项目）已于2023年全线贯通，标志

着管道运输已经开始大规模应用。

4.2 氢储运

氢能在碳中和目标中扮演至关重要的角色，作为一种清洁能源，在燃烧过程中只产生水，没有二氧化碳排放，因此被广泛视为实现碳中和的关键手段，其储运技术是实现氢能大规模应用的基础。目前主要的氢储运技术包括高压储氢、液氮储运以及金属氢化物储氢。高压储氢最为常见，是将氢气压缩至700MPa，来提高氢的体积能量密度，使更多的氢储存在较小的空间内。高压储氢系统的充装与释放速度较快，适合频繁使用的场景。

液氮储运则是将氢气冷却至-253℃，使其转变为液体状态。这种方法大大提高了氢的密度，便于大规模储存和长途运输。然而，维持如此低温需要复杂的绝热技术和持续的能量输入来抵消冷量损失。液氢储运主要用于跨地区的批量运输，如专用的液氢槽罐车和船舶运输等。

5 结论

综上所述，碳中和背景下的油气储运技术研究涵盖了多个技术领域，从传统的石油和天然气输送技术改进，到新兴的二氧化碳和氢能储运技术，每一部分都在向着更安全、更高效、更环保的方向发展。通过不断的技术创新和应用，油气储运将在保障国家能源安全和实现“双碳”目标中发挥重要作用。

参考文献：

- [1] 王轩滨.油气储运中油气回收技术的发展与应用初探[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(24):163-165.
- [2] 刘晴,赵得强,李京,刘亮,郭峰.油气储运中油气回收技术的发展与应用探讨[J].化工安全与环境,2023,36(11):56-58.
- [3] 黄维和,宫敬,王军.碳中和愿景下油气储运学科的任务[J].油气储运,2022,41(06):607-613.
- [4] 郑斌,王胜功,杨春,刘志博,杨志彤,邵琪.油气储运中油气回收技术的应用与优化[J].石化技术,2021,28(07):65-66.

作者简介：

李峰 (1987-) 男, 汉, 青海湟源人, 大学本科, 中级工程师, 研究方向: 节能低碳与污染物治理。
徐敬波 (1978-) 男, 汉, 安徽合肥人, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向: 安全生产与碳排放管理。
吴晓 (1972-) 男, 汉, 甘肃静宁人, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 安全环保管理。