煤层气开采全流程碳排放源分析及降碳路径思考

赵　娟[1, 2]　王建中[1, 2]　孟尚志[1, 2]　万　毅[3]　张守仁[1, 2]
1. 中联煤层气有限责任公司　北京　100015
2. 三气共采省技术创新中心　太原　030000
3. 中国海洋石油集团有限公司　北京　100010

摘　要：煤层气作为相对清洁的能源，在“碳达峰”与“碳中和”战略下被期待在能源转型中起到支撑作用，但其含碳属性一定程度上又制约其远期发展。本文针对煤层气生产全流程分析了各环节的碳排放，可以归纳为燃料燃烧CO_2排放、净购入电力热力隐含的间接CO_2排放、工艺放空CH_4排放、CH_4逃逸排放、火炬燃烧的CO_2和CH_4排放五类。并针对五类排放源提出减排思路，探索建立煤层气开发全流程的降碳增效路径。

关键词：煤层气；全流程；碳排放源；降碳路径

前言

中国是全球主要的消费大国。2023年，国内原油消费量7.56亿吨，全球占比16.5%，对外依存度为73%；全国天然气表观消费量3945.3亿立方米，全球占比10%，对外依存度为42.3%。2023年碳排放量126亿吨二氧化碳当量，占全球总排放量的33.7%，碳减排任重道远。2020年9月，总书记在第七十五届联合国大会上向全球郑重宣布我国碳达峰、碳中和目标，党中央、国务院作出了实现“双碳”目标的一系列战略部署，碳达峰碳中和“1+N”政策逐步出台。国资委提出“到2025年，中央企业万元产值综合能耗比2020年下降15%”的目标，石油企业面临发展和减排的双重压力[1-4]。以中国海油为例，十年间，油气产量增加22.5%，综合能耗总量增加107%，年均增加10.7%，能耗强度增加63%，年均增加6.3%，作为一个全力增储上产的油气公司降碳压力巨大。

煤层气是一种典型的低碳清洁能源，在全球减碳的大趋势之下，已成为助力碳减排的重要之举，但是其在开采过程中仍会产生大量温室气体。煤层气企业在国家增储上产的战略要求下，产能跟随大幅提升，意味着需要更大综合能耗，在此背景下，亟需探索煤层气开发全流程的降碳增效路径，为打造煤层气“碳中和”产业链奠定基础。

依托项目：山西省重点研发项目“山西省地下咸水层二氧化碳地质封存选区关键技术研究”

作者简介：赵娟，女，博士，高级工程师，主要从事非常规天然气开发工作。

一、煤层气生产全流程碳排放环节分析

煤层气地面开采从前期准备到最终产气外销各生产环节的工艺流程可分为地震、钻前、钻井、压裂、地面建设、排采和集输等阶段，其中钻井环节可细分为钻井、测井、试井和固井。本文围绕各环节生产工艺，分析可能存在的潜在排放源。通过分析，煤层气开采过程的排放源可以归纳为燃料燃烧CO_2排放、净购入电力热力隐含的间接CO_2排放、工艺放空CH_4排放、CH_4逃逸排放、火炬燃烧的CO_2和CH_4排放五类，排放源示意图如图1所示。

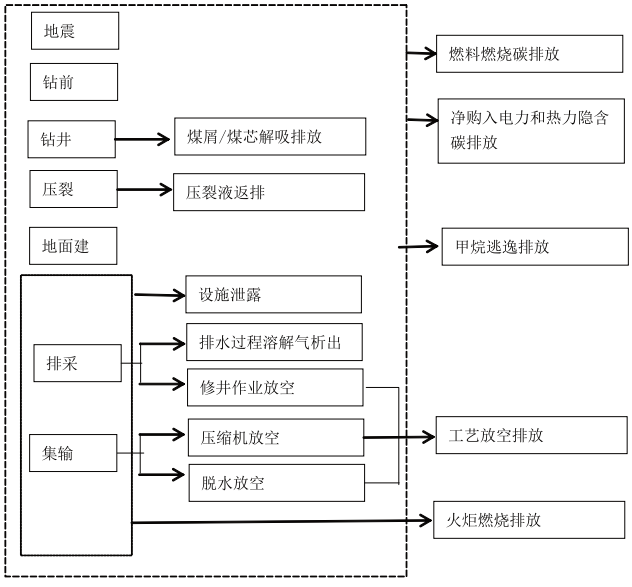

图1　煤层气开采过程排放源示意图

二、开采过程碳减排思路

（一）燃料燃烧碳减排

地震和钻前燃料燃烧排放主要来源于车辆、柴油发

电机等，通过对车辆和柴油发电机加装尾气净化装置、燃油车辆更新为LNG车辆、创新车辆调配提高车辆运行效率等措施降低碳排放。钻井过程利用变频调速的原理改变电源频率，采用柴油机的电喷技术取代变频器技术，达到精确控制转速的目的，使用高效率的传送设备对钻井设备进行改革和更新，利用液力耦合器较少原动机的扭振，均可以降低电动机的能量损耗，同时选择节能型电动机，节约更多的电能损耗，总体来说钻井环节降排主要从系统提升能效水平出发。压裂环节降低燃料燃烧碳排放主要通过提高压裂装备能效，研用新技术，例如二氧化碳增能体积压裂技术，在压裂过程中注入液态二氧化碳，既大幅提升压裂效率，又可以进行二氧化碳的封存利用。油气田地面建设工程是耗能主体，应该全局出发，全面分析建设各环节中能耗，系统优化建设方案，以期达到投资少、能耗低、运行效率高的目的。排采环节通过改进排采设备和流程的设计，使用节能设备等措施提高能效，降低碳排放量。可通过应用智能化抽采等精准抽采技术，突破软煤层塌孔和废弃煤矿瓦斯开发等技术瓶颈，提升抽采瓦斯体积分数，从源头上减少煤矿瓦斯的排放。集输环节可通过模型优化布局，从源头上设计降低能耗，同时优化压缩机组和集输泵机组输出参数，并做好保养和维护，提高设备运行效率。

总体而言，该部分的减排思路主要依赖优化流程设备及工艺技术，整体提高能效，同时降低化石燃料占比来实现。

（二）甲烷逃逸碳减排

现有技术可以解决70%以上的甲烷逃逸，但因为监管法律有待完善、高投资回报率要求以及对常规采气操作的影响，尚未大规模应用。现有手段包括：1）淘汰高排放器件，可贡献总减排量的30%。2）安装蒸汽回收装置、排污捕获单元、柱塞、火炬燃烧等对甲烷排放环节加以控制，占甲烷总减排量的7%。3）泄漏检测和修复：通过使用红外摄像头等技术定位和修复全价值链泄漏，占甲烷总减排量的26%。4）其他新兴技术：如数字传感器、预测分析、应用卫星以及无人机检测泄漏、压缩及液化甲烷气副产物的微技术、减少甲烷的催化剂等，占甲烷总减排量的4%。然而这些新技术需要较高的安装成本和人力资本，企业缺乏在这一领域进行投资和创新的动力。

（三）工艺放空碳减排

开采过程中工艺放空主要包括：修井作业放空、压缩机放空和脱水装置尾气排放。调研发现企业大多未在开采井口的放空管、压缩机放空口或设备进、出口安装气体流量计，难以获得实测数据。修井作业放空和压缩机放空体量的数据统计，也未提上日程。针对脱水装置尾气排放，可以通过压缩机将煤层气增压后，通过管线进入处理中心回收利用，该部分的技术工艺均比较成熟。蒋泽等人研发出用于天然气三甘醇脱水装置的尾气处理工艺及处理装置，解决现有天然气三甘醇脱水装置产生的尾气直接排放至大气中。

（四）火炬燃烧碳减排

对于开采企业来说用火炬燃烧处理零散气是更简单、更容易的方法。Cushing等学者表示，火炬”燃烧导致温室气体排放、浪费能源、并可能对附近居民造成健康影响，通过研究2012年–2016年NOAA地球观测组为德克萨斯州南部鹰福特页岩地区统计的卫星数据，有45亿立方米的天然气被火炬燃烧处理，足够为大约250万套房屋供热一年。目前除了传统的火炬气回收工艺，还研发出水合物法回收工艺和膜分离法回收工艺。然而无论哪种回收工艺都有自己的适用范围，不能独自解决所有的问题，将技术进行优化组合也许是一种更合理的方向。

表2　火炬气燃烧减排策略

减排思想	减排策略
杜绝出现火炬焚烧的需求	设计油井的时候添加二级分离器
回收火炬气并作为天然气或LNG（天然气凝析液）销售	（1）储罐增加VRU（气体回收单元）设备 （2）在试井和完井阶段减少火炬焚烧 （3）压缩天然气并使用公路运输 （4）火炬气回收
将原本直接燃烧掉的天然气储存起来	将天然气注入油气藏进行储存
寻找天然气送火炬焚烧后的其他用途	利用气体发电
提高火炬焚烧效率	提高人工调节蒸汽/空气助燃火炬的焚烧效率；提高无人井站小火炬的焚烧效率

（五）净购入电力和热力隐含的碳减排

电力贯穿了整个矿区的生产以及生活的各个方面，发电厂生产电能都会产生一定数量的碳排放。超过90%的煤层气田通过电网来为采气设备供电，需要消耗大量的化石燃料，增加了净购入电力隐含的碳排放。可以根据井场实际情况发展风电、光伏等新能源技术降低碳排放，提高绿电替代率，同时降低净购入电力或热力隐含

的碳排放。因此，在开采过程中，应对各个开采环节进行优化整合，减少不必要的电力消耗。

三、结论与展望

（1）煤层气开采全过程，碳排放源归纳为燃料燃烧CO_2排放、净购入电力热力隐含的间接CO_2排放、工艺放空CH_4排放、CH_4逃逸排放、火炬燃烧的CO_2和CH_4排放五类。不同的排放源对应的减排策略不同。同时，油气公司应加强基础数据统计及研究，借助卫星等先进手段进行宏观数据采集，提升碳排放的监测手段。

（2）行业降碳是个系统工程，应加强全局思考，系统谋划长远。一是对已建成的气田，可通过优化流程、引入节能提效工艺技术及装备、强化管理提升等措施提高能源利用效率，同时加大排放治理，降低排放量，实现生产全流程降碳。二是对于拟新建气田而言，从建设初期应该树立低碳理念，立足全局，不仅算好经济账，还要算好绿色低碳账，综合考量，将节能降碳理念融入到各个设计环节，实现新建气田的降碳减排。

（3）重视战略规划引领，加强效果评估。很多油气公司为落实上级机构双碳目标，制定的降碳方案是基于总部的减排要求，而总部的降碳要求涉及面比较广泛，具有普适性。应立足自身实际，根据行业环境和上级要求，结合自身，制定科学合理的“双碳”战略规划，加强跟踪评估，确保双碳目标实现。

（4）加强化系统思维，细化方案举措。目前很多公司减排举措比较分散，缺乏系统性。应从全局出发，分析公司目前的重点排放环节、重点排放设备，有的放矢进行减排，通过技术可行性及经济性分析，优化出最优降碳技术和措施。细化减排方案，确保方案落地生效。目前节能设备的引进吸收不足，调研显示几乎每个环节都已研发出提升能效的设备，应对标国际或国内先进水平，提升重点耗能设备能效标准，提升准入门槛，淘汰落后设备。

（5）大力推进绿电替代。在聚焦油气主业下，发展风电、光伏、地热等业务，以替代油气生产过程中的化石燃料消费。深化油气勘探开发与新能源融合发展。依托矿区和周边资源，加强新能源开发，提高绿电替代率。加强政策研究，树立新型理念。随着碳市场不断扩容，结合CCER将低浓度瓦斯和风排瓦斯利用纳入碳交易市场，煤层气企业盈利模式或发生转变。

参考文献

[1]王芳.全力向2050碳循环经济之路迈进[N].中国石油报，2022年6月6日（第004版）.

[2]渠沛然.非常规油气如何跑好增储上产“接力棒”[N].中国石油报，2022年6月7日（第007版）.

[3]殷建平，张孝童.绿色发展背景下国内外石油公司的低碳策略探究[J].对外经贸实务，2022,（05）：21-24.

[4]曾兴球.端稳能源饭碗 保障供应安全[J].国际石油经济，2022，30（1）：20-21.

[5]刘明，孟庆利，杜园，等.地震勘探技术在南川地区页岩气勘探开发中的应用[J].油气藏评价与开发，2022，12（3）：407-416.