

天然气与氢气混合燃料：经济性剖析与可持续发展

路径探究

付新程（山东建筑大学热能工程学院，山东 济南 250101）

摘要：在全球能源转型背景下，本研究聚焦天然气和氢气混合燃料的经济性与可持续发展。通过案例分析、数据建模等方法，发现混合燃料成本受氢气制取、天然气获取及混合输送影响，如工业副产氢利用和现有管网掺氢输送可降成本，英国 HyDeploy 项目则面临经济障碍。其在可持续发展方面优势显著，能大幅减少碳排放与其他污染物，优化能源结构，保障供应稳定，掺氢和安全技术也有突破。未来，混合燃料在能源供应、工业和民用领域前景广阔，需加强国际合作，以推动全球能源转型。

关键词：天然气；氢气；经济性；可持续发展；全球能源转型

1 引言

在全球能源转型的大背景下，能源结构调整与可持续发展成为国际焦点。随着工业化和城市化进程加速，全球能源需求持续上升，传统化石能源的大量消耗引发能源短缺、环境污染和气候变化等问题。国际能源署（IEA）数据显示，过去几十年全球能源消耗总量逐年递增，化石能源占比居高不下。在此形势下，寻找清洁、高效、可持续的替代能源成为缓解能源压力、减少碳排放的关键^[1]。

天然气作为相对清洁的化石能源，在全球能源结构中占据重要地位。其主要成分甲烷燃烧产物的二氧化碳排放量低于煤炭和石油，且燃烧效率高。近年来，随着勘探与开采技术进步，全球天然气储量和产量稳步增。英国能源研究院（EI）发布的《世界能源统计年鉴》显示，2023 年，全球天然气产量达到 4.05 万亿立方米，比 2022 年高 0.3%。美国《油气杂志》年度评估显示，根据各国截至 2023 年 1 月 1 日发布的最新油气储量报告，全球已探明的天然气储量估计为 7456 万亿立方英尺，高于去年的 7297 万亿立方英尺。天然气广泛应用于发电、供暖、工业燃料等领域，支撑着全球经济发展^[2]。

氢气作为清洁能源，燃烧热值高、零碳排放，随着可再生能源电解水制氢技术成熟，绿氢规模不断扩大。但储运和应用成本高、加氢设施不完善，限制其大规模应用。将氢气与天然气混合，为解决这些问题提供新思路^[3]。

混合燃料兼具两者优势，能实现能源高效利用与低碳排放。能源供应上，可借助现有天然气基础设施，

降低氢气储运成本，提升能源供应稳定性；工业领域用于工业锅炉等设备，满足能源需求同时降低碳排放；民用领域可用于供暖、烹饪，减少对传统化石能源依赖。

研究天然气和氢气混合燃料的经济性与可持续发展意义重大。经济层面，分析成本、价格和效益，为企业和决策者提供依据，制定合理政策与投资策略；可持续发展层面，评估环境影响，推动能源绿色转型，探讨技术研发与应用前景，为能源科技创新指明方向^[4]。

国外对混合燃料研究起步早，欧盟、英国、日本等取得显著成果；国内起步晚但发展迅速，国家电投有示范项目。在经济性与可持续发展研究上，国内外角度各有侧重，但都存在不足。

本研究采用案例分析和数据建模分析方法，选取典型项目，运用经济计量和生命周期评价模型定量分析。创新点在于多维度综合分析，结合我国能源市场实际提出针对性产业发展策略。

2 混合燃料的经济性分析

2.1 氢气制取成本

目前，氢气制取成本是影响天然气和氢气混合燃料经济性的关键因素之一。制氢方法主要有电解水制氢和化石燃料重整制氢。电解水制氢清洁环保，但成本高，电力成本占总成本 70% 以上，设备成本约占 14%。以 1000Nm³/h 规模的 PEM 电解槽为例，成本约 3000 万元，含土建等共约 3200 万元，生产 1 公斤氢气耗电约 50.4 度，按工业电价 0.4 元/度算，电费成本约 20.16 元/公斤。未来技术进步和规模化生产有望大幅降成本。

化石燃料重整制氢在当前应用广泛，例如天然气

重整制氢技术成熟度高、成本相对较低，但其过程存在碳排放问题；煤炭气化制氢成本受煤炭价格、运输成本等因素影响，在煤炭资源丰富的地区具备一定的成本优势，然而需配套完善的环保设施以降低对环境的影响。此外，技术研发水平、规模化生产程度、政策扶持力度等因素，都会对不同制氢方法的成本产生显著影响，进而影响天然气和氢气混合燃料的经济性与可持续发展。

2.2 天然气获取成本

天然气获取成本对混合燃料成本影响重大，涵盖国内开采与进口两方面。

国内开采成本受地质条件和开采技术影响。如四川盆地气田地质复杂，开采难度大，投入高；鄂尔多斯盆地则相对成本低。先进开采技术虽提升效率，但设备和技术投入也增加了前期成本。

据国家统计局数据，2023 年规上工业天然气产量 2297 亿立方米，同比增长 5.81%。中国报告大厅监测统计显示 2023 年 1-12 月全国天然气产量为 2297.1 亿立方米，累计增长 5.85%。《中国天然气发展报告（2024）》显示，2023 年全国天然气产量 2324 亿立方米，同比增长 5.63%。《中国天然气行业年度运行报告蓝皮书（2023-2024）》显示，2023 年全国天然气产量达 2353 亿立方米，增速为 5.7%。

进口天然气来源多元，包括管道和 LNG 进口。管道进口受建设运营成本和国际政治关系影响，如中哈管道；LNG 进口受国际价格、运输及接收站成本影响，国际天然气价格波动大，运输和接收站建设运营成本也高。国际天然气价格上涨时，进口成本增加，使混合燃料成本上升，影响市场需求和投资决策。

2.3 混合与输送成本

混合燃料的混合工艺成本涵盖多个关键环节。在掺混环节，精确控制氢与天然气比例是关键，需高精度气体流量控制系统和混合设备。静态混合器结构简单、维护成本低但混合效果弱；动态混合器混合效果好，不过设备与运行成本高，还需投入建设混合站。

质量检测与控制同样重要，要对混合燃料实时检测，检测项目众多，需配备气相色谱仪等专业且昂贵的设备，设备定期维护校准，还需专业人员操作分析，进一步增加人工成本。

利用现有天然气管网掺氢输送有成本优势，相比新建纯氢管道，可节省大量管材采购、铺设等巨额投资。在欧洲部分国家已有成功尝试。

但对现有管网改造也需不菲费用。氢气特殊物理

性质易引发氢脆，威胁管道安全与寿命，因此要评估、选择管道材料，可能更换或特殊处理管材，如老旧钢管换为抗氢脆材料。同时，管道连接部件等也需改造升级，还需调整运行管理，制定安全规程与监测方案，这些都增加了输送与运营成本。

3 经济可行性案例分析

3.1 工业领域案例 - 新奥燃气在江苏泰兴开展的工业园区掺氢项目

新奥燃气在江苏泰兴工业园区开展的掺氢项目，是工业领域应用天然气和氢气混合燃料的成功范例。该项目将 10% 体积比例的氢气掺入天然气，高效利用当地工业副产氢资源。

成本效益层面，项目优势明显。成本上，回收工业副产氢，降低氢气制取成本，避免资源浪费与环境污染；借现有天然气管网掺氢输送，相比新建纯氢管道，造价大幅降低，纯氢管道每公里造价约为天然气管网两倍以上，而改造现有管网成本低。效益上，混合燃料成本低，首年可替代 310 万方天然气，为企业节省数百万能源成本；同时，企业碳排放降低，契合环保政策，提升社会形象，减少环保成本。

投资回收期方面，项目主要投资于掺氢站建设、设备购置及管网改造，因能稳定降低企业能源成本，投资回报率高，经济可行性强。

此项目对工业企业降本作用突出。在能源价格上涨的当下，工业企业能源成本压力大。使用掺氢天然气，企业无需改变设备和生产工艺就能有效降本，且随着技术进步和规模化应用，成本有望进一步降低。掺氢天然气还能提高能源利用效率，减少浪费，助力企业进一步削减能源成本。

3.2 民用领域案例 - 英国 HyDeploy 项目

英国 HyDeploy 项目探索将 20% 氢气掺入天然气网络供居民使用，对居民能源支出影响显著。一方面，氢气掺入优化能源结构，产物仅水，环保且符合可持续发展趋势，改善生活环境。但另一方面，氢气能量密度约为天然气的 1/3，相同体积混合燃料能量少，国际能源署数据显示，掺入 3% 氢气最终能量减少约 2%，居民为满足能源需求需消耗更多燃料，试点区域居民反馈燃气费用上涨，带来经济压力。

项目推广面临经济障碍。氢气制取运输成本高，电解水耗电多、设备贵，化石燃料重整受价格波动影响且有碳排放，工业副产氢回收受产量和分布限制；运输方式成本高、有安全风险。同时，天然气基础设施需改造，氢气特性致管道氢脆，要评估选择材料、

改造连接部件等，投入大。

对此可采取解决措施。政府和企业加大制氢技术研发投入，发展可再生能源电解水制氢；加强新型运输技术研究，如固体、有机液体储氢。对于基础设施改造成本，政府补贴、企业合作分担，探索新型管道材料和技术，如抗氢脆管材、涂层防护，降低改造难度与成本。

4 混合燃料的可持续发展分析

4.1 环境效益显著

天然气和氢气混合燃料在碳排放减少上优势突出。天然气主要成分甲烷燃烧产二氧化碳，每立方米约2.16kg；氢气燃烧产物仅为水。如掺氢20%的1m³混合燃料，二氧化碳排放量约1.73kg，比纯天然气减排约19.9%。在英国、德国等发达国家，燃气发电站使用15%–20%掺氢比例的混合燃料，二氧化碳减排15%–20%。我国也在城市燃气供暖系统试点，掺氢10%取得良好减排效果。减少碳排放既能改善空气质量，又能降低企业环境成本。

混合燃料在其他污染物减排上同样出色。氮氧化物方面，氢气燃烧特性使燃烧更充分，掺氢20%时，相比纯天然气，氮氧化物排放量降低15%–20%。颗粒物排放上，氢气燃烧无颗粒物，掺氢10%的混合燃料可使颗粒物排放降低20%–30%。二氧化硫排放因氢气几乎无硫杂质，掺氢后混合燃料硫含量降低，随着掺氢比例增加，二氧化硫排放量降低10%–15%。

4.2 能源安全与供应稳定

在能源结构优化上，混合燃料意义重大。全球传统能源结构以化石能源为主，弊端诸多，如资源有限、污染环境。氢气清洁环保，与储量丰富、供应稳定的天然气混合，可实现能源结构多元化。我国能源结构长期以煤炭为主，环境污染和碳排放问题严重，混合燃料有广阔应用前景，可在天然气充足地区试点，探索发展模式。

混合燃料能有效应对能源需求波动。能源需求有季节性和时段性波动，天然气储存调节能力强，氢气制取可结合可再生能源。冬季供暖季需求高时，将储存的氢气与天然气混合增加供应；夏季需求低时，用可再生能源制氢储存。一些地区建立的可再生能源制氢与天然气混合能源供应系统，通过智能化管理平台精准控制，保障了能源供应稳定，提高了利用效率。

4.3 技术发展与创新

掺氢技术取得突破。新型动态混合工艺通过动态

搅拌装置，让氢气和天然气混合更均匀，缩短混合时间，提高效率，使混合燃料燃烧性能更稳定，能源利用效率更高。高效混合设备采用先进设计，能在低能耗下实现高效混合，还具备智能控制功能，可实时调整混合比例。这些技术在工业和民用领域应用效果显著，提高了燃烧效率，减少了污染物排放。

安全技术保障有力。氢气易燃易爆，针对此特性，改进管道材料，研发含镍、铬等元素的抗氢脆合金材料，有效阻止氢原子扩散聚集，保障混合燃料安全输送。升级安全监测系统，氢气泄漏、压力、温度等传感器实时监测，智能化监测平台整合分析数据，异常时自动启动应急预案，提高了安全管理效率和水平，预防安全事故发生。

5 结论与展望

本研究全面剖析天然气和氢气混合燃料的经济性与可持续发展。经济性上，成本受氢气制取、天然气获取及混合输送影响。案例分析证实其经济可行性，关键因素有气价波动、掺氢比例和政策补贴。可持续发展层面，混合燃料环境效益显著，能大幅减少碳排放和其他污染物。它优化能源结构，保障供应稳定，掺氢和安全技术也取得进展。展望未来，混合燃料前景广阔。能源供应上，可再生能源制氢占比将提升；工业领域，在钢铁、化工等行业应用更广泛，预计2030年使用量大幅增长；民用领域，会走进更多家庭，使用更智能。未来需加强国际合作，分享经验、制定标准、搭建平台，推动产业全球化。在技术和政策助力下，混合燃料有望在能源市场发挥重要作用，推动全球能源转型。

参考文献：

- [1] 曾明国. 天然气分布式能源站经济影响因素研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(20): 73-75.
- [2] 吴丽丽, 田磊, 郭海涛, 等. 天然气供应紧张背景下德国的经济适应及启示 [J]. 中国能源, 2024, 46(04): 90-99.
- [3] 李乔楚, 张鹏, 陈军华. 四川省天然气产业安全—经济—环保耦合协调度研究——基于能源“不可能三角”视角 [J]. 天然气技术与经济, 2024, 18(01): 7-14.
- [4] 丁为. 天然气长输管道经济评价影响因素分析 [J]. 中国集体经济, 2023(32): 8-11.

作者简介：

付新程（2002-），男，汉族，山东济南人，本科，研究方向：新能源科学与工程。