

行交叉复测，对比评估扫描结果的稳定性与偏差来源<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 实际工程应用效果对比

基于西安航天制造中心一套铝合金抛物面反射面天线的批产任务，本研究把工艺路径自适应规划、切削参数多目标优化以及六点运动学夹具补偿联合部署到同一工序链，并在与 3.1 一致的计量条件下开展机内外一致化评估。进一步观察发现，口径残余形貌中的中频波纹能量被明显下压，径向分段统计呈现由高曲率区向低曲率区的平缓递减，低阶指向漂移项亦得到抑制。需重点关注的是，效率提升并未引发热致低频隆起的加剧，稳定叶瓣图约束与功率上限协同把颤振与峰值切削力维持在可接受区间。由此推导，形面 RMS 指标与节拍性指标可作为联动优化的核心观测量，且两者变化的相关性与路径中速度前瞻、夹具微调量的设定紧密耦合。见表 1，RMS 误差从 0.15 mm 收敛至 0.08 mm，同时以相对尺度计的加工效率提高 22%，这与路径在曲率跃迁处的步距缩放以及恒力支承的法向约束增强相一致。结合重复装夹与换刀批次的稳定性记录，非劣解参数组在不同扇区的适配性保持良好，口径误差场的环向波数分布由高阶主峰转移为低阶可控分量，表明路径光顺与姿态约束把中频纹理的生成机制显著削弱。在不改变材质与热处理制度的前提下获得该幅度的收敛，说明误差预算中各来源的均方合成与补偿分配得当，为后续口径放大与材料替换提供可迁移的工艺边界<sup>[5]</sup>。

表 1 某反射面天线优化前后形面精度与加工效率对比表

指标	评价方式	优化前	优化后	变化幅度
形面精度 RMS 误差	mm	0.15	0.08	-46.7%
加工效率	相对值	1.00	1.22	+22.0%

## 5 结语

本文从误差机理出发，系统建立反射面天线形面精度

的工艺控制方法。通过将多源误差折算为统一均方指标，明确热源强度、磨损速率与机床刚热时间尺度对误差频段的主导作用；以曲率场驱动的路径自适应规划与速度前瞻相结合，显著抑制曲率跃迁区的切削力峰值与中频纹理；以切削参数多目标优化耦合稳定叶瓣图与功率边界，在精度、效率与刀具寿命间实现非劣平衡；以六点运动学夹具、恒力支承与微调补偿协同降低装夹耦合并实现区域预控。计量验证显示，口径 RMS 由 0.15 mm 收敛至 0.08 mm，效率提升 22%，中频能量下压与指向漂移抑制相互印证路径光顺与夹具约束的有效性，且在重复装夹与换刀批中保持一致。该研究为高频段反射面制造提供了机制可解释、数据可追溯的工艺闭环。未来将面向更大口径与新材料开展拓展，融合机内温场与力学状态的在线感知与前馈补偿，结合数字孪生与自适应控制拓展至五轴复杂姿态加工，并在相位误差到方向图的跨域评估上实现模型与实测的一致化，以进一步提升工艺的可迁移性与规模化能力。

#### 参考文献

- [1] 刘莉,史骏,张丽媛,张宗芳,张顺吉.一种基于力密度敏度的网状反射面天线多约束找形方法[J].机械设计与制造工程,2025,54(06):132-138.
- [2] 孙伟,刘晓宇.13.2m天线日照温度变形主面精度测量研究[J].宇航计测技术,2024,44(02):39-44.
- [3] 雷震,赵亚博,任毅行.面向天线变形补偿的分区可动副反射面设计[J].电子科技大学学报,2025,54(02):166-173.
- [4] 赵强强,刘世伟,姜冬磊,余德文,李明,陈飞飞,郭俊康,王柏村,张进华,洪军.基于人在回路的大型星载平面天线形面精度调控[J].机械工程学报,2025,61(15):399-416.
- [5] 王永强,徐德红,罗晓龙.某35m方位一俯仰型天线结构在有限空间内的试装工艺与轴系精度检测分析[J].中国机械,2025,(19):25-28.

# Green Methanol Production via Integrated Biomass Fermentation and CCUS: Pathways, Case Studies, and Emission Reduction Benefits

Zhigang Su

Daqing Oilfield Chemical Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163310, China

## Abstract

Under the “dual carbon” goals, traditional methanol production faces increasing pressure for carbon reduction. This paper proposes and analyzes an innovative technological pathway that utilizes agricultural waste (straw, manure) as raw materials, producing bio-synthetic gas (Bio-SNG) through anaerobic fermentation, followed by the synthesis of green methanol. By deeply integrating carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology, it establishes a complete “from biomass to green chemicals” negative carbon industrial chain. Combining industrial practices from the chemical company, the study details the core technological advantages of high-solid-content horizontal plug-flow fermentation reactors, achieving a gas production rate exceeding  $6.0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ . The full life cycle carbon footprint analysis reveals that the bio-synthetic gas exhibits a low carbon intensity of  $-124.45 \text{ g CO}_2\text{eq}/\text{MJ}$ , demonstrating significant “negative carbon” properties. The paper further explores strategies for capturing and utilizing byproduct  $\text{CO}_2$ , as well as the market competitiveness of green methanol products certified by the International Society for Carbon Capture and Utilization (ISCC) EU. The research not only provides a concrete solution for the chemical company’s green transformation—achieving annual  $\text{CO}_2$  reductions of approximately 380,000 tons through a 24-million-cubic-meter annual Bio-SNG and downstream green methanol project—but also explores a viable pathway for China’s refining industry to utilize agricultural and forestry waste for resource recovery, ensuring energy security and achieving deep emission reductions.

## Keywords

Anaerobic biomass fermentation; Bio-SNG; Carbon footprint; ISCC certification; Green chemistry;

## 集成生物质发酵与 CCUS 的绿色甲醇生产：路径、案例与减排效益

宿志刚

大庆油田化工有限公司，中国·黑龙江大庆 163310

## 摘要

在“双碳”目标背景下，传统甲醇生产的碳减排压力日益增大。本文提出并分析了一种以农业废弃物（秸秆、粪污）为原料，通过厌氧发酵制取生物天然气（Bio-SNG），继而合成绿色甲醇的创新技术路径，并深度耦合碳捕获、利用与封存（CCUS）技术，构建完整的“从生物质到绿色化学品”的负碳产业链。文章结合化工有限公司的产业实践，详细阐述了基于高固含量卧式塞流式发酵反应器的核心技术优势，其单位容积产气率可达  $6.0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  以上。重点分析了该路径的全生命周期碳足迹，其生物天然气的碳强度低至  $-124.45 \text{ g CO}_2\text{eq}/\text{MJ}$ ，具备显著的“负碳”属性。论文进一步探讨了副产物  $\text{CO}_2$  的捕集与利用策略，以及绿色甲醇产品通过国际 ISCC EU 认证所带来的市场竞争力。研究表明，该技术为天然气化工发展提供新路线，也为我国炼化行业探索了一条资源化利用农林废弃物、保障能源安全、实现深度减排的可行路径。

## 关键词

生物质厌氧发酵；生物天然气（Bio-SNG）；碳足迹；ISCC 认证；绿色化工

## 1 引言

甲醇作为关键的化工平台分子和潜在的清洁燃料，其绿色化生产是化工行业脱碳的核心议题之一。化工有限公司作为中国石油旗下的重要炼化企业，积极践行国家“双碳”

战略与中石油“清洁替代、战略接替、绿色转型”的部署，依托黑龙江省丰富的生物质资源，开创性地布局了以农业废弃物制生物天然气，进而生产绿色甲醇的产业路径。2024年10月15日，绿色甲醇获得国内首个 ISCC EU 认证（国际可持续发展与碳认证）。2025年5月17日，首批绿色甲醇通交付加注流程，打通从秸秆粪污加工-绿色甲醇生产-运输-集货-加注-燃料入船各环节，做到 ISCC 认证全

【作者简介】宿志刚（1982-），中国辽宁开原人，本科，工程师，从事化工生产方面研究。

流程通畅,确保“生物质绿色甲醇”性质不变。本文旨在系统性地论述该技术路线的工艺原理、核心优势、减排效益及发展前景,以为行业提供可借鉴的“大庆案例”。

## 2 技术路径与核心工艺

技术总览 以秸秆、粪污等废弃物的生物质为原料,采用干式厌氧发酵技术,生物质秸秆和粪污从反应器一端送入,在反应器内经过26天的反应发酵时间,从反应器另一端引出。罐内发酵固含量为22%-25%,同时定期监控反应物30-40:1的碳氮比条件。生物质原料以塞流式向前横向推进,从厌氧反应器顶部收集产生的沼气导入储气包中,经提纯后,获得生物天然气,送入甲醇生产工厂。生物天然气通过CNG管束车卸至甲醇装置原料气管线,进入甲醇生产装置,工艺上采用纯氧二段炉生产技术,低温氧化锌脱硫、二段蒸汽转化、低压合成、三塔精馏的工艺路线生产甲醇。

中国每年产生约8.65亿吨秸秆资源,其中可收集量达7.34亿吨,但利用率仅为11.8%。畜禽粪污量38亿吨,综合利用率60%,有40%未处理,造成了严重的农业面源污染。生物质甲醇技术,可将秸秆、畜禽粪污等废弃物转化为化工基础原料,实现资源化利用。绿色甲醇凭借其环保特性和认证优势,在国内外市场都获得了广泛认可。在国内市场,产品主要供应给高端化学品制造商和新兴的绿色燃料领域。特别是在制药、电子级化学品等对原料纯度要求严格的行业,绿色甲醇因其优异的品质和稳定的供应获得了客户青睐。同时,随着我国绿色燃料标准的逐步完善,绿色甲醇作为清洁能源组分在船用燃料、燃料电池等领域的应用前景广阔。绿色甲醇虽然生产成本略高于传统甲醇,但市场售价高出传统甲醇,毛利率显著提升。更长远地看,随着全球碳定价机制的推广和碳税政策的实施,绿色甲醇的经济优势将进一步凸显。除了直接的经济效益,绿色甲醇项目还带来了显著的社会效益和环境效益。

核心创新:最核心的创新点在于原料替代,即用有机废弃物替代传统化石燃料作为生产原料。在生产工艺方面,公司优化两种原料气掺混比例,试验摸索催化剂最佳反应参数,提高反应收率,最大程度降低产品单耗。公司成功完成了ISCC EU(国际可持续发展和碳认证)绿甲醇产品认证工作。ISCC是全球公认的可持续性认证体系,其认证过程严格评估产品的原料来源、生产工艺、碳排放等全生命周期环境影响。获得该认证意味着绿色甲醇产品符合欧盟严格的可持续发展标准,为企业产品进入国际市场扫清了技术壁垒。这一认证工作本身也是技术创新的重要组成部分,包括建立完整的碳足迹核算体系、原料溯源系统等。该技术路线的实现,为国内绿色甲醇的生产开辟了一条技术成熟、可推广路径。

绿色甲醇合成 经净化提纯后的生物天然气通过蒸汽重整或自热重整转化为满足甲醇合成要求的合成气,随后在催

化剂作用下合成粗甲醇,并经精馏得到产品级绿色甲醇。此过程的技术集成与优化是保障最终产品经济性的关键。

技术优势 国内生产绿色甲醇主要有三种路径,分别是生物质发酵路径与生物质气化路径、生物质二氧化碳加氢路径。三者可持续性在环保方面具有显著优势,能够有效利用可再生资源,减少对化石燃料的依赖,并具有碳中和的潜力。然而,技术成熟度方面,生物质气化的工艺流程较长,涉及多个反应步骤和设备,尤其是气化炉对入炉生物质原料要求苛刻,适应性相对较差,需要复杂的预处理过程,容易积灰或结焦、碳转化率低、对操作条件和技术要求较高,且原料供应的稳定性和气化效率的提高仍是需要解决的问题,这也限制了其技术推广,国内暂时还没有成熟的、长周期运行的工业化装置。生物质二氧化碳加氢技术中可再生能源电力溯源方面,要求电网需要独立电网,风光电的波动性对系统的稳定运行提出了更高要求,为了解决这一问题,需要开发更高效的电源管理系统和储能设备,以实现能源的平稳输出和稳定供应。但电解槽、电源管理系统和储能设备的成本较高,导致整个系统的初始投资和运行维护费用居高不下,这是制约项目发展的关键点。相比之下,生物质发酵生物天然气重整法制甲醇技术生产工艺成熟、可靠性强,原料采用农畜废弃物来源充足,大规模生产能够有效降低单位产品的成本,即有助于实现碳减排更有利于环境保护。

## 3 绿色低碳与CCUS属性分析

### 3.1 全生命周期“负碳”属性

该技术的绿色低碳属性根植于其全生命周期(LCA)分析,贯穿“原料—过程—产品—末端”各环节,形成系统性的碳减排与移除能力。

- 原料碳中和:秸秆等生物质在生长过程中通过光合作用吸收大气中的CO<sub>2</sub>,其作为原料使用时,所释放的碳本质上属于近期大气碳的再循环,不会额外增加大气碳总量,与化石能源动用地质历史时期储存的碳有本质区别。这种基于生物质的碳循环,构成了典型的短期闭环碳循环体系,是能源系统脱碳的重要路径之一。

- 过程负排放:以粪污为原料,厌氧发酵过程在密闭环境中进行,不仅避免了自然发酵产生的大量甲烷(CH<sub>4</sub>)排放(其全球变暖潜势GWP为CO<sub>2</sub>的21-28倍),而且将有机物转化为沼气。根据国际可持续碳认证(ISCC EU 205)方法计算,生物天然气的碳强度低至-124.45 g CO<sub>2</sub>eq/MJ。该负值表明,每提供1兆焦耳的能量,不仅在直接燃烧环节实现近零排放,更因避免甲烷排放和生物碳循环特性,实现了124.45克二氧化碳当量的净环境移除,即“负排放”。这使其成为少数兼具能源供应与碳移除功能的技术。<sup>[2]</sup>全生命周期核算生物质甲醇碳排放值(-48.31 g CO<sub>2</sub>eq. per MJ),减排比例达到151%。

- CCUS闭环:在生物天然气净化单元,可分离出高