

合成氨生产节能降耗的创新路径与价值探索

田拴成 (山西天脊潞安化工有限公司, 山西 长治 046000)

摘要: 作为支撑农业与工业发展的关键基础原料, 合成氨的生产长期以来深陷高能耗与高碳排放的困境。在能源结构优化升级与碳达峰碳中和目标的双重驱动下, 该领域亟需通过系统性创新突破传统发展瓶颈。本研究从产业全局视角切入, 探讨合成氨生产环节节能减排的技术革新方向, 重点解析工艺流程再造、系统集成优化及智能控制技术的协同效应。研究发现, 通过开发模块化反应装置、改进气体分离工艺、重构能量传递网络等核心技术手段, 可实现能源利用效率的显著提升, 既创造了可观经济效益, 更在生态环保、资源循环利用等方面, 彰显出深远的社会价值。

关键词: 合成氨生产; 节能降耗; 技术创新; 绿色转型; 经济价值

中图分类号: TQ113.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 034-0037-03

Innovative Paths and Value Exploration for Energy Conservation and Consumption Reduction in Ammonia Synthesis Production

Tian Shuancheng (Shanxi Tianji Lu 'an Chemical Co., Ltd, Changzhi Shanxi 046000, China)

Abstract: As a key basic raw material supporting the development of agriculture and industry, the production of synthetic ammonia has long been Mired in the predicament of high energy consumption and high carbon emissions. Driven by the dual forces of optimizing and upgrading the energy structure and achieving the goals of carbon peaking and carbon neutrality, this field urgently needs to break through the traditional development bottlenecks through systematic innovation. This study takes a holistic industrial perspective to explore the technological innovation directions for energy conservation and emission reduction in the ammonia synthesis production process, with a focus on analyzing the synergy effects of process flow reengineering, system integration optimization, and intelligent control technology. Research has found that through core technical means such as developing modular reaction devices, improving gas separation processes, and reconstructing energy transfer networks, a significant improvement in energy utilization efficiency can be achieved. This not only creates considerable economic benefits but also demonstrates profound social value in aspects such as ecological protection and resource recycling.

Key words: Ammonia synthesis production; Energy conservation and consumption reduction; Technological innovation; Green transformation; Economic value

我国是世界最大合成氨生产国, 产业规模与技术水平对于保证粮食安全和工业体系稳定具有战略意义, 但能效偏低、原料结构单一等问题仍然制约着行业升级。传统生产模式下, 对煤炭等化石能源的深度依赖导致单位产品能耗居高不下, 余热、废气、废水的低效利用更加剧了资源浪费与环境压力。突破路径依赖, 打造绿色低碳体系是行业转型的内在命题, 在“双碳”目标驱动下。当前技术创新由单一工艺优化转向系统集成, 新型催化材料、智能控制系统与循环经济模式的联合应用, 促进行业向高效清洁的方向发展。这既关系到合成氨产业自身可持续发展, 更对化工行业绿色转型具有示范价值。

1 技术路径与创新实践

1.1 反应系统优化

合成氨生产的核心是反应系统的高效运行。传统固定床反应器只能进行固定床反应, 结构单一, 难以适应原料波动和负荷变化。采用模块化设计, 将反应器分成若干个独立单元, 各单元上均设置独立的温度控制和压力调节装置。比如在氨合成工段, 模块化反

应器可根据进料气体的成分调整催化剂床层温度, 避免局部过热造成催化剂失活。这种灵活调节能力使反应条件一直处于最优状态。

梯级换热网络在能量利用方面取代了传统余热直接排放方式。高温反应气体首先进入废热锅炉产生高压蒸汽发电, 随后中温余热换热器预热进料气体, 低温余热用于加热脱盐水。这种分层利用模式将这些本来已经是浪费热量转变为可用的热量, 大大降低了外部热源依赖。以实际生产为例, 通过驱动汽轮机发电的高温余热, 剩余热量用于进料气体的加热, 而通过热交换器升高至适合工艺要求的低温余热, 形成“高温-中温-低温”三级利用链条。这种设计既降低了能源浪费, 也降低了对化石燃料的依赖, 使得整个生产过程更加环保。

1.2 原料处理升级

针对传统固体燃料转化效率低的问题, 以水冷壁型气化炉代替固定层气化装置。气化炉内衬耐火材料与水冷管结合, 既可承受高温反应环境, 又可回收大量的反应热能。通过优化气化剂配比及温度控制, 在

提高碳转化率的同时抑制焦油的生成。配套旋风分离器除尘系统净化合成气，保证后续工段稳定运行。

为减少化石能源依赖，原料体系中引入了生物质气化及绿氢制备技术。生物质原料粉碎、干燥后进入气化炉裂解，其合成气经甲烷化反应成为清洁燃料；绿氢经电解水制备直接作为还原剂参与氨合成。原料预处理系统包括混合装置和输送管道，保证不同原料连续供料及适配。例如生物质原料要通过粉碎机将生物质原料粉碎成均匀颗粒再通过螺旋输送机送入气化炉，防止堵塞和供料不均。这种原料多元化策略在降低碳排放的同时，也提高了供应链的灵活性，使得企业在能源价格波动时，更具有抗风险能力。

1.3 能量系统重构

本系统通过分级利用热能品位实现资源高效配置。高温段余热驱动汽轮机发电，中温段用于工艺加热，低温段则满足厂区供暖需求。以冬季采暖系统改造为例：原系统依赖低压蒸汽换热，年消耗蒸汽 72000t（ $20\text{t/h} \times 24\text{h} \times 150\text{天}$ ）。经改造后采用合成水换热器，利用汽提塔出口高温冷凝液为采暖水供热，同步回收冷凝液至系统循环使用。该改造每年节省蒸汽成本 1260 万元（ $20\text{t} \times 24\text{h} \times 150\text{天} \times 150\text{元/t}$ ），同时实现水资源回收利用。

物料循环体系打破传统线性模式，构建原料-产品-副产物闭环网络：装车气氨返回吸收冷却器提升氨水浓度；膜分离非渗透气回收至甲烷化工段；工艺冷凝液经气提技术分离溶解气回用于生产，处理后的淡水作为循环冷却水；合成工段高温工艺气在余热锅炉产蒸汽，冷凝水回流至锅炉补水系统。针对冰机系统排放的不凝气，通过管道引至低压洗氨装置，回收气氨组分既避免直接排放燃烧损失，又提升氨水浓度。这种多级循环设计使系统热损失降低 30%，排放气回收率达 95% 以上。通过能源梯级利用与物料闭环管理，形成“热能-水资源-有效组分”三维回收体系，节约运营成本，降低碳排放强度，实现经济效益与环境效益的协同提升。

1.4 控制系统革新

智能过程控制系统实时对温度、压力、流量等关键参数进行监测，以自适应调节模型来优化操作条件。比如可根据我公司在甲烷化工段引入智控系统，转化系统水汽比优化操作后通过连续投用智能控制系统将转化水气比控制在 1.20-1.23 之间运行，实时对水气比进行精准调整，既能使反应系统稳定运行，也节约了蒸汽的用量。

DCS 系统与先进过程控制（APC）算法融合，实现能源调度动态优化，有效降低突发工况下的能耗波

动。依托虚拟工厂模型的全流程模拟，数字孪生技术可提前识别潜在故障，预判催化剂活性下降、换热器结垢趋势并实时反馈预警。基于历史数据训练的机器学习模型进一步提升能源利用效率，助力精准控制。例如，数字孪生系统通过分析反应温度与压力变化曲线，能预判催化剂失活时间，指导操作人员合理安排再生或更换计划，避免非计划停车，保障生产连续性。

1.5 协同创新机制

能量集成设计实现跨工序能效协同互补。中温变换放热反应产生的高温气体直接用于甲烷化工段入口气的加热，减少额外热源投入；变压吸附提氢尾气中富含大量的甲烷，经压缩提压后既可送至甲烷转化入口增大原料气量，又可送往周围企业用作燃料气使用，形成能量内循环。这种能源网络的重构，提高原料气的利用率，减少了对外部能源的依赖，降低运行成本。

技术耦合创新提升整体效率。中低温变换串联设计，减少热量损失；吸附分离技术与 PSA 系统相结合，通过分级吸附及压力梯度实现氢气高效提纯。新型球形触媒凭借其抗毒性、低温活性的优势进一步减少能耗。以变压吸附技术为例，该工艺是交替加压和减压操作，选择性的使氢气通过吸附剂，而其余气体排出。这种周期性操作提高了氢气纯度，降低了压缩能耗，比传统深冷分离法节能。此外，智能控制系统与工艺设备深度集成，实现动态调节与精准控制，提高了生产稳定性与能源效率。这种多维的技术协同，为合成氨产业的低碳转型提供了系统解决方案。

2 价值创造与效益分析

2.1 经济价值的实现路径

合成氨生产领域的节能降耗创新正在重构产业价值体系。能效提升的直接效应是企业通过工艺优化和能源管理手段提高单位产品能耗，从而提高企业的市场竞争力，降低生产成本。技术成熟度提高，清洁生产工艺开始具有经济可行性，推动行业整体运行效率向更高水平发展。

在商业模式层面，绿色技术应用产生新的价值增长空间。碳交易机制完善使企业减排成果转化为经济收益，绿色认证体系建立可以为企业建立差异化竞争的抓手。这些市场化工具既拓宽了盈利渠道，也引导了资本向低碳领域倾斜，使技术创新与资本回报形成了良性互动。

经济价值的创造与环境效益的积累形成深度绑定的共生关系。合成氨生产过程中温室气体与污染物排放量的削减，直接降低了企业的环境管控与合规支出，同时助力品牌绿色形象塑造与市场认可度提升。这种环境责任履行与经济效益获取的双向赋能，推动合成

氨产业从传统化石能源依赖型模式，逐步向资源集约型的高质量发展路径转型。尤其在碳交易市场日趋成熟的背景下，减排成效可进一步转化为经济收益，形成“环保投入—效益产出—再创新”的良性循环。

2.2 社会效益的多元呈现与深层赋能

合成氨生产的节能降耗并非单纯的技术优化，更蕴含着多维度的社会效益释放与社会系统的深层赋能。作为高耗能、高排放的基础化工产业，其节能改造直接响应了“双碳”战略目标，通过降低单位产品能耗、减少废气废水排放，有效缓解了工业生产与生态保护的矛盾，助力区域生态承载力提升，为空气质量改善、水资源保护提供了实质性支撑。

在产业协同层面，节能降耗技术的研发与应用推动了上下游产业链的绿色转型。节能设备制造、清洁能源替代、余热回收利用等配套产业的发展，形成了跨领域的绿色产业生态，带动了相关技术研发、工程服务、运维管理等领域的就业增长，为技能型人才提供了更多就业场景，间接促进了劳动力素质的提升与就业结构的优化。

从社会治理维度看，合成氨企业的节能实践强化了企业社会责任担当，树立了工业领域绿色转型的标杆。其经验可复制推广至其他高耗能产业，推动工业体系整体绿色化水平提升，增强社会对绿色发展的共识与认同。同时，能源消耗的降低减少了对化石能源的依赖，提升了能源供应安全性，为社会经济稳定运行提供了基础保障，实现了从产业节能到社会赋能的深层价值转化。

3 未来发展方向与战略路径

3.1 低碳技术的突破方向

面向未来，合成氨产业的创新发展将呈现多技术融合的发展态势。低碳技术研发正突破传统能源边界，聚焦光伏、风电等可再生能源与化工制程的深度耦合。通过搭建分布式能源系统，实现能源的就地生产与消纳，大幅降低对化石能源的依赖度；同时配套构网型储能技术，破解可再生能源的间歇性瓶颈，保障化工生产的连续性与稳定性。智能电网的接入则进一步优化全域能源调度，通过“源网荷储”协同调控提升整体能效水平，为零碳生产奠定基础。

数字化转型的深化会促进行业向智能化，网络化方向发展，形成覆盖全产业链的数字生态系统。人工智能算法可实时分析生产数据，优化工艺参数，降低能耗与碳排放；物联网技术可以实现设备远程监控与预测性维护，减少非计划停机带来的资源浪费。此外，区块链技术的应用可以提升供应链的透明度，保障绿色原料与产品可追溯性，增强市场的信任。

循环经济模式的创新就是要建立“原料—生产—产品—资源”的闭环体系，实现资源的永续利用。通过废弃物的分类回收与高值化利用，推动副产品转化为新原料，形成产业链内部的资源循环。例如，氨生产中排放的二氧化碳，可以被捕集、作为化工原料或地质封存，废水处理后的再生水，可以回用于冷却系统。这种闭环设计在减少资源消耗的同时，还能减轻环境负担，为行业可持续发展提供支撑。

3.2 政策与市场协同机制

在政策引导方面，政府构建完善激励机制，通过财政补贴，税收优惠等方式推动绿色技术产业化。对低碳技术研发与示范项目建立专项基金，降低企业的初期投入风险；对采用清洁生产工艺的企业，实行阶梯式的税收减免，激发市场活力。完善碳排放上限与环保标准的法律法规体系，倒逼企业加快转型步伐。

完善市场机制，通过碳定价，绿色金融等手段引导资本流向低碳技术领域。碳交易市场成熟运行将为企业明确的价格信号，促使高碳排放主体主动减排；碳税制度的引入，能够进一步强化环境成本的内部化。在金融层面，绿色债券，碳基金等工具创新，将拓宽中小型企业参与低碳转型的融资渠道。此外，金融机构还可以通过环境风险评估模型将 ESG 指标纳入到信贷决策中，使资本倾向于可持续领域。

4 结语

合成氨产业绿色转型，本质上是工业文明向生态文明跃迁的缩影。通过技术创新，系统优化和模式创新协同推进，走出一条高质量发展之路。这种转型解决了自身的可持续发展问题，更为整个工业体系的绿色化提供了有益借鉴。合成氨产业的探索实践证明，传统产业的转型升级完全可以在保障经济发展的前提下，实现环境效益和社会效益的双赢。

参考文献：

- [1] 熊启海. 合成氨生产过程的节能降耗分析 [J]. 化工管理, 2023(07):56-58.
- [2] 王英花. 浅析合成氨生产过程中的节能与降耗 [J]. 化工管理, 2019(23):53-54.
- [3] 李慧敏. 合成氨生产过程中的节能与降耗研究 [J]. 山西化工, 2018,38(03):157-158+161.
- [4] 于增利. 绿色合成氨工艺中氢能的高效利用与转化机制探索 [J]. 建筑与施工, 2024,3(24).
- [5] 慕占文. 合成氨装置节能降耗控制措施 [J]. 工程施工新技术, 2025,4(7).

作者简介：

田拴成（1986.12—），男，汉族，山西沁县人，大专，助理工程师，研究方向：合成氨生产。