

# 合成氨装置的节能降碳技术改造与经济效益分析

胡伟 曹涛涛 卢晓飞 王康 骆丽娜 (山东盛发焦化有限公司, 山东 济宁 272300)

**摘要:** 面对着能源转型及“双碳”目标实现, 合成氨装置的高耗能、高排碳的特点更加凸显, 节能减排已经成为了行业高质量发展之要务。本文在整理合成氨装置的能耗分布及其碳排放源的基础上, 从调整原料结构、气化及净化工艺革新、合成回路效率提高、余热余压回收利用等及智能控制管理系统建设等方面, 着手研究合成氨装置节能降碳技术改造的技术方案并分析其经济性, 旨在为此类企业的技术升级及投资提供借鉴。

**关键词:** 合成氨装置; 节能降碳; 技术改造; 经济效益分析

**中图分类号:** TQ113.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 007-0091-03

## Energy-saving and carbon-reduction technological transformation and economic Benefit Analysis of Ammonia Synthesis plants

Hu Wei, Cao Taotao, Lu Xiaofei, Wang Kang, Luo Lina (Shandong Shengfa Coking Co., Ltd., Jining Shandong 272300, China)

**Abstract:** Amid the energy transition and the pursuit of carbon peaking and carbon neutrality goals, the high energy consumption and carbon emissions of ammonia synthesis units have become increasingly prominent. Energy conservation and emission reduction have thus become critical priorities for the industry's high-quality development. This paper systematically analyzes the energy consumption distribution and carbon emission sources of ammonia synthesis units. It proposes technical solutions for energy-saving and carbon-reduction upgrades, including optimizing raw material structures, innovating gasification and purification processes, enhancing synthesis loop efficiency, and recovering waste heat and pressure. Additionally, it explores the economic feasibility of intelligent control and management system development. These findings aim to provide actionable insights for technological upgrades and investment decisions in this sector.

**Key words:** Ammonia synthesis plant Energy conservation and carbon reduction; Technological transformation; Economic benefit analysis

合成氨作为基础化工产品和农业生产的重要原料, 在保障粮食安全与化工产业链稳定方面具有不可替代的作用。然而, 传统合成氨装置工艺流程长、用能环节多, 导致单位产品能耗和二氧化碳排放水平偏高, 已成为制约行业可持续发展的突出瓶颈。在国家推进碳达峰碳中和、实施《合成氨行业节能降碳专项行动计划》的背景下, 既有装置普遍面临能效水平不高、余热余压利用不足、自动化程度偏低等问题, 难以适应绿色低碳发展的要求。因此, 有必要立足生产实际, 系统识别装置能耗与碳排放的关键环节, 统筹考虑工艺、设备和管理等多方面因素, 科学设计节能降碳技术改造方案, 在降低能源资源消耗的同时提升经济效益, 为实现合成氨行业的绿色低碳转型提供技术支撑和实践路径。

### 1 合成氨装置能耗与碳排放分析

#### 1.1 合成氨生产流程与能耗构成

典型的合成氨装置以煤或天然气为原料, 整体流程包括原料气制备、净化、压缩、氨合成及尾气回收等环节。原料气制备环节需将煤或天然气转化为富含氢氮的粗合成气, 此过程消耗大量燃料与电力。净化阶段通过变换、脱硫脱碳等工序去除杂质, 为后续合

成反应提供合格气源, 同时伴随冷热介质和动力设备的持续用能。压缩工序需将合成气多级压缩至高压, 是装置中能耗最集中的部分之一。进入合成塔后, 在催化剂作用下反应生成的氨经冷却分离, 未反应气体则循环使用。各工序间通过换热网络回收部分余热, 用于产生蒸汽或加热工艺介质, 但仍有相当部分低位热能随冷却水等介质排出。因此, 装置的能耗构成主要包括原料与燃料消耗、电力消耗以及蒸汽和热能消耗, 其中高温热源和高压压缩环节对总能耗影响最为显著<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 合成氨装置碳排放来源与强度

合成氨装置的碳排放主要来自化石能源燃烧和原料转化过程。在以煤为原料的工艺中, 煤既作原料也作燃料, 气化、燃烧及供热过程会释放大量二氧化碳; 以天然气为原料的装置, 其碳排放主要来自天然气重整制氢及辅助锅炉燃烧。此外, 空气分离制氮、部分工艺尾气排放、设备与管道泄漏等环节也会产生温室气体。由于我国合成氨产能以煤为主, 单位产品碳排放强度明显高于以天然气为主的生产路线。在现有工艺结构下, 合成氨装置的碳排放与生产规模、原料种类、能源结构及余热利用水平密切相关, 若不实施系统性

节能降碳改造,单位产品碳排放将难以实现有效下降。

## 2 合成氨装置的节能降碳技术改造策略

### 2.1 原料结构优化与清洁化替代

为系统降低合成氨装置的综合能耗与二氧化碳排放强度,企业应从全局出发,对原料路线、燃料结构和供能方式进行一体化重构。首先,应基于全生命周期能耗与碳足迹分析,对不同原料路线的单位产品能耗、原料成本、碳排放因子进行量化比较,明确煤制氨、天然气制氨及未来绿氢路线的优化方向。其次,在保障系统安全运行及产品品质的基础上,循序渐进地增加天然气、低碳氢等清洁原料使用量,有序减少高碳固体燃料消耗量;对于现有煤制氨装置,进行存量煤制氨装置分质用煤和混煤优化研究,从提升入炉煤料品质稳定性,以减少气化工段耗能和无用排渣入手。同时,企业也要结合地区能源供给条件以及相关政策指引,积极引入风电、光电等可再生绿色电力,以及电解水制氢等第三方清洁原料供应渠道,签订长周期购电(氢)合同,或者合作投资一体化配套工程,以保证清洁原料的可靠供给<sup>[2]</sup>。

同时,企业需要把燃料结构清洁化同用能电气化结合起来,全面分析,有序地取消掉那些低效率、高污染的自备燃煤锅炉以及小规模工业窑炉,转而使用高效集中供汽及绿电直供,来满足自身所需的蒸汽和电力。针对一定要保留下来的燃料燃烧过程,则应当尽量选择那些含硫量少、灰含量低、发热量大的优质燃料,并且加装高效低氮燃烧机和烟气余热利用装备,以达到提高燃烧效率和协同减排的效果。除此之外,企业也应该制定原料同燃料之间的相互调配机制,及时响应市场价格同碳价信号的变化,如在电力价格低谷时让用电设备多承担些工作量,在风光等可再生电源大发期间尽可能多地吸纳绿电等,在确保企业生产经济价值的前提下,使节能减排的效果最优化。

### 2.2 先进气化与净化工艺升级

针对当前合成氨行业加速推进节能降碳改造的形势,企业应当把气化及净化工序作为工艺革新的重点,引进高效、低碳、可靠性强的新技术,全面提升原料气生产及提纯过程中的能量利用效率。其中,就煤制氨工艺来说,应该推广采用水冷壁式水煤浆加压气化、粉煤加压气流床气化等先进的气流床工艺,来淘汰落后的、能耗大、污染严重的固定层间歇式气化方式;在进行气化炉升级改造的同时,要合理地调整相关的气化炉的操作压力、氧煤比以及炉型结构,提升冷煤气的效率和碳的转化率,同时配套设置全废锅或者半废锅流程,以回收高温粗合成气的热量,并副产高品质蒸汽供透平或者工艺加热利用,从而节省外部供热

燃料。其次,企业也应该重视原料煤预处理系统的完善,通过混煤、洗选等方式来优化入炉煤品质,降低气化煤中灰分、硫分和水分的波动幅度给气化炉带来的不利影响。

在气体净化阶段,企业应该使用低温甲醇洗、液氮洗等先进的脱硫脱碳工艺,来代替原来能耗大、物料消耗大的工艺,从而更好地脱出并回收硫化氢、二氧化碳等酸性气体。而在变换工段,则可以使用等温变换工艺,在维持高的变换率的基础上,降低了反应器的温度变化幅度和体积大小,提升了热能的利用效率。同时,企业也应该改善净化系统的换热网络以及能量阶梯式使用策略,比如用变换气的余热去加热锅炉用水或者除盐水,低温余热用来制冷供热,减少劣质蒸汽用量等等。此外,企业还应完善净化系统运行参数在线检测及智能化调控手段,通过对吸收塔高度、再生塔温度等一系列的操作指标进行优化,以减少溶剂流量和降低再生功耗<sup>[3]</sup>。

### 2.3 合成回路能效提升技术改造

由于合成回路是整个合成氨装置能量最为密集、操作最为复杂的部分,合成回路的能耗高低也代表了整个装置的能量消耗与碳排放水平,企业应该从反应动力学提升、传热传质效率优化以及设备能源利用率提高三个方面着手,对合成氨装置的合成回路进行节能降碳的技术改造工作。首先,是对现有的氨合成塔内部结构进行技术评审并加以改造,引入采用轴径向流、多段内冷式的高效率内部结构,改善气体流通状态、控制催化剂床层温度变化趋势,进而能够提升单程转化率、增强氨净值,可以有效地压缩循环气流量,进而降低压缩机做功耗。其次,要积极推广使用新型高效的氨合成催化剂,在保证催化剂活性及使用寿命的前提下,适度地压低反应的操作压力与温度,以削减压缩功耗用量和降低循环比率。再者,是要优化合成回路系统的余热回收流程,合理地布置废热锅炉或者蒸汽发生器,以充分回收反应过程中产生的热量,并转换成中高压的蒸汽供透平做功,或者作为工艺加热介质使用。

### 2.4 余热余压综合利用系统优化

面对不断攀升的能源成本以及日趋严峻的温室气体排放限制条件,合成氨装置应当充分发掘自身所蕴含的余热余压资源潜能,在整体性设计与精准化管控下,将其从无用废能转变为可以带动生产的有用功。在实践中,企业应对整个装置进行一次彻底的能量普查,找出不同温度等级和不同压力等级下的余热余压资源有哪些,如气化炉产生的高温高压粗煤气中的显热、变换工段的中低温废热、合成反应的反应热,蒸

汽冷凝水的压力势能、驰放气回收的化学能等等，并列出层次化使用表单。然后，在上述工作之上搭建多层次热能阶梯式利用框架，比如对高温煤气余热可考虑副产高品质蒸汽，供驱动透平或者工艺加热使用；对于中低温位废热，则可以通过余热锅炉或者 ORC 发电等方式给工厂供电，或者提供低品质热源；针对蒸汽冷凝水的压力势能，可以通过闪蒸、背压发电等手段加以回收，层层利用，最大限度地回收能量<sup>[4]</sup>。

## 2.5 智能化与数字化节能管控体系建设

面对国内合成氨行业加快推进数字化、智能化发展的浪潮，企业应当把节能减碳同智能制造紧密结合在一起，在整个企业中打造一个集成化的智能管控平台，使企业的生产能够被精确操控，能源使用效率得到即时优化，并且管理层做出明智决策。在具体应用当中，企业需要在整个装置上布置一系列精密的传感器以及各种在线检测仪器，以便于可以高频次地、高精度记录下涉及温度、压力、流速、组成的各种工艺指标，进而保证后续进行数据分析以及优化控制时候有可信的数据来源。与此同时，要引进先进的过程控制系统以及全流程智能化调控系统，来对气化、净化、合成等一系列重要环节进行多变量耦合控制，从而实现实时自动调整优化操作条件，降低人为因素导致的操作扰动幅度，提升整套装置的运行稳定性，并取得更高的能源利用率。除此之外，还需要建立起一套能源管控平台同碳排放管理系统，把包括电力、蒸汽、燃料等各种形式能源的使用量及碳排放量汇集到一起，加以统计分析，并在平台上直观显示，供领导层参考决策。

与此同时，企业应当应用工业互联网、大数据以及人工智能等技术手段，对企业历史运行数据加以深入分析，构建装置能效基线模型及能耗模型，判断出企业的能效瓶颈及运行异常情况，并给予相应的提升策略。如通过合成塔运行数据分析，提升催化剂活性以及操作压力，提升氨净值；通过对气化炉运行数据进行分析，降低氧煤比、控制炉温，提升冷煤气效率等等。此外，还应该开发智能预警与故障诊断平台，实现实时监控与故障预警，在故障发生之前进行检修，以减少由于机器故障所造成的突发停车现象，以及因此而产生的大量能源损失。

## 3 经济效益分析

合成氨装置的节能降碳技术改造，可以降低能耗物耗、增强系统运行的可靠性和稳定性、削减对外排放量，并减少相关的排放费用，进而大幅提升企业的盈利能力及现金流状况。其中，改造的直接收益主要来自能耗物耗减少这一方面，它意味着企业外购燃料、

动力的花费相应缩减了，单位产品所获得的毛利也因此而增加了。与此同时，余热余能等资源的再利用使废弃物变废为宝，将废弃能量转换成了电或者蒸汽，代替了一部分需要从外部购买的能量，在节约了用能成本的同时，还提升了企业抵御能源市场价格风险的能力。再则，先进的工艺技术和高效的机器设备还能在一定程度上延长催化剂使用寿命、减少机器设备维修频次，降低了维修费和备品存货金额，进而压缩了运营成本，增加了最终的盈利额度。

在经济收益及整体效益方面，虽然节能降碳改造有一定的一次性资金成本支出，但项目一般具有较短的投资回报年限和较高的投资内部收益率，改造后单位产品能耗及物耗的降低，直接带来长期的成本节支；产品品质及装置可靠性的改善，有利于企业提升装置运行负荷、调整产品结构，以获取更高的市场收益。在政策方面，改造有利于企业应对日趋严峻的能源消耗与碳排放限制要求，避免可能发生的环境罚款与减产损失，确保生产的稳定开展。

## 4 结束语

总之，合成氨装置的节能降碳升级是全方位的工作，涉及到原料路线、工艺技术、能量利用及管理方式的多个维度组合。在整个装置层面开展原料结构调整、先进的气化及净化、合成回路效率提升、余热余压梯级利用及智能控制管理系统建设，可以大幅度减少企业的能源及物料消耗，提高装置运行可靠性及灵活性，同时也能较好地把控碳排放和环境风险问题。

从经济价值上来看，虽然改造有初始投资成本，但在节省能耗支出、减少维修开支、提升产品竞争力以及规避政策风险等多个方面产生的综合效益是非常可观的，大部分项目具有较短的投资回报周期和优秀的内部回报率。未来，在日趋严格的绿色低碳发展要求之下，合成氨企业应当不断探索并优化技术方案和管理制度，以节能降碳为契机，推动产品结构调整和数字智能化建设相融合，创造低消耗、低排放、高效率的新型发展模式，为行业的转型升级以及国家“双碳”目标的达成做出贡献。

### 参考文献：

- [1] 郭辉, 刘强, 王兵. 40 万 t/a 合成氨装置改造运行总结 [J]. 氮肥与合成气, 2025, 53(12): 14-17.
- [2] 韩永才. 合成氨装置的全流程动态仿真模拟 [J]. 石化技术, 2025, 32(10): 37+51-53.
- [3] 尹廷翔. 合成氨装置碳排放计算及分析 [J]. 大氮肥, 2025, 48(S1): 81-83.
- [4] 马瑞. 合成氨装置一段转化炉检修和维护策略 [J]. 大氮肥, 2025, 48(S1): 38-40+56.