

# 化工合成氨工艺分析及节能改造措施

杜 政

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃二分公司 宁夏 银川 750000

**摘要:** 化工合成氨工艺涵盖原料气制备、净化、压缩、合成等环节,以煤、天然气为原料,经气化、变换、脱硫脱碳等工序制得合成气,在高压、高温及催化剂作用下合成氨。当前工艺存在能耗高、设备效率低等问题。节能改造可从原料优化、设备升级、余热回收、催化剂研发及数字化智能化改造等方面入手,以降低能耗,提升生产效率,推动合成氨产业绿色低碳发展。

**关键词:** 化工合成氨; 工艺分析; 节能改造措施

引言: 化工合成氨作为基础化工领域的关键产业,在农业化肥生产、工业原料供应等方面意义重大。然而,传统合成氨工艺能耗高、碳排放量大,与当下节能减排、绿色发展的要求不相适应。在全球能源紧张和环保压力持续增大的背景下,对化工合成氨工艺进行深入剖析,探寻切实可行的节能改造措施,不仅关乎企业自身的可持续发展,更是推动整个化工行业向绿色低碳方向转型升级的重要举措。

## 1 化工合成氨工艺原理与流程分析

### 1.1 合成氨反应原理

(1) 化学反应方程式: 合成氨的核心反应为  $N_2+3H_2\rightleftharpoons 2NH_3$ , 该反应具有放热、气体分子数减少的特征,正反应为可逆反应,需在特定条件下推动平衡正向移动以提高氨的产率。(2) 热力学与动力学特性分析: 热力学上,低温、高压有利于反应正向进行,但低温会降低反应速率;动力学层面,需通过催化剂(如铁基催化剂)降低反应活化能,同时搭配适宜的温度、压力条件,实现反应速率与平衡转化率的平衡。

### 1.2 传统工艺流程及关键设备

(1) 原料气制备: 主流原料为天然气或煤,天然气制氢通过蒸汽转化反应生成CO、H<sub>2</sub>混合气体,煤制氢则经气化、变换工序获得H<sub>2</sub>;同时需分离空气中的N<sub>2</sub>,最终配制成1:3(N<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>)的原料气。(2) 净化与压缩: 先通过脱硫工序去除原料气中的硫杂质(避免毒害催化剂),再经变换反应将CO转化为CO<sub>2</sub>,随后脱碳去除CO<sub>2</sub>;净化后的原料气需压缩至15-30MPa,满足合成反应的高压要求。(3) 合成塔反应与循环系统: 高压原料气进入合成塔,在催化剂作用下生成NH<sub>3</sub>,塔内通过换热回收反应热;由于反应转化率低,未反应的N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>需经分离工序分离出NH<sub>3</sub>后循环回合成塔,提高原料利用率<sup>[1]</sup>。

### 1.3 工艺能耗分布与关键节点

(1) 能量消耗的主要环节: 合成气压缩工序能耗占比最高,需消耗大量电能维持高压;其次是原料气制备中的转化、气化工序,需消耗燃料提供反应热量;此外,反应热回收效率直接影响总能耗,高效回收可降低辅助能源消耗。(2) 典型工艺的能耗指标对比: Kellogg法为传统高压工艺,吨氨能耗约32-35GJ;AMV法采用低压合成技术,搭配高效换热器,吨氨能耗降至28-30GJ,较Kellogg法节能10%-15%,核心优势在于降低了压缩工序能耗及反应热损失。

## 2 化工合成氨工艺能耗问题诊断

### 2.1 能量损失的主要来源

(1) 反应热未充分利用: 合成氨反应为强放热反应,每生成1molNH<sub>3</sub>可释放约46.1kJ热量。实际生产中,部分装置换热系统设计不合理,反应热回收效率仅60%-70%,大量余热随冷却介质直接排放;同时,高温反应气降温过程中热量传递存在梯度损失,未有效用于原料气预热、蒸汽制备等工序,导致能源浪费。(2) 设备效率低下: 核心耗能设备运行效率偏低是能量损失的关键环节。其中,合成气压缩机长期运行后叶轮磨损、密封性能下降,等温压缩效率从设计值的85%降至75%以下,额外增加电能消耗;换热器结垢、传热面积不足等问题,导致传热系数降低,需消耗更多能源维持工艺温度平衡,进一步加剧能耗损失。(3) 循环系统能耗过高: 由于合成氨反应转化率仅10%-20%,大量未反应的N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>需通过循环系统回收复用。部分装置循环压缩机选型不当,或循环管路阻力损失过大,导致循环系统能耗占总能耗的30%以上;同时,循环气中微量NH<sub>3</sub>未彻底分离,易造成催化剂活性下降,间接增加反应环节的能量消耗。

### 2.2 制约节能的关键因素

(1) 工艺参数控制不精准: 合成氨反应对温度、压力、原料气配比等参数敏感性极强。部分装置采用传统

手动控制或简易自动控制,参数波动范围较大,如反应温度偏离最优区间 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 时,反应效率下降5%-8%,能耗显著上升;此外,原料气配比偏离1:3的理想比例,会导致反应平衡逆向移动,增加循环负荷与能耗。(2)设备老化与匹配性差:老旧装置中,大量核心设备已接近使用年限,如转化炉、合成塔内件老化,导致反应效率降低;同时,设备间匹配度不足,如余热锅炉与反应系统热负荷不匹配,无法充分吸纳反应余热,或压缩机与后续工序压力需求不匹配,造成能量冗余损耗,制约整体节能效果<sup>[2]</sup>。(3)余热回收技术不足:现有余热回收技术存在局限性,如低品位余热(100-200 $^{\circ}\text{C}$ )回收效率低,多直接排放;部分装置缺乏高效余热回收设备,如未采用热管换热器、吸收式制冷机组等先进设备,无法将余热转化为电能、冷能等可利用能源;此外,余热回收系统集成度低,各工序余热无法统筹利用,进一步限制节能潜力发挥。

### 3 化工合成氨工艺节能改造技术路径与措施

#### 3.1 原料与工艺优化

(1)原料结构调整:推行天然气替代煤制氢的原料升级方案,相较传统煤制氢工艺,天然气制氢具有反应条件温和、能耗更低的优势。煤制氢吨氨能耗约38-42GJ,而天然气制氢吨氨能耗可降至28-32GJ,降幅达15%-30%。同时,天然气制氢工艺污染物排放更少,可同步实现节能与环保双重目标。对于富煤缺气地区,可采用煤制氢与天然气掺烧的混合原料模式,逐步过渡优化,平衡原料供应与节能需求。(2)低能耗合成工艺应用:推广低温低压合成技术替代传统高压工艺,如AMV低压合成技术、卡萨利低能耗合成工艺等。此类工艺通过优化催化剂活性与反应器结构,在10-15MPa、350-400 $^{\circ}\text{C}$ 的温和条件下即可实现高效合成,较传统高压工艺(20-30MPa)大幅降低合成气压缩工序的能耗。以AMV工艺为例,吨氨压缩能耗可减少3-5GJ,结合高效换热系统,整体能耗较传统工艺降低10%-15%。

#### 3.2 设备升级与系统集成

(1)高效压缩机与透平机应用:更换老化低效的往复式压缩机为高效离心式压缩机,其等温压缩效率可提升至88%以上,较传统设备降低10%-15%的电能消耗;同时,采用蒸汽透平驱动压缩机,利用工艺余热产生的蒸汽提供动力,替代部分电能,进一步降低电耗占比。此外,对透平机进行密封升级与叶轮优化,减少能量泄漏,提升能源利用效率<sup>[3]</sup>。(2)智能控制系统优化反应条件:搭建基于PLC(可编程逻辑控制器)的智能控制系统,实时采集反应温度、压力、原料气配比等关键参

数,通过闭环控制将参数波动范围控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.5\text{MPa}$ 内,确保反应始终处于最优工况。系统可根据原料组分变化自动调整配比,避免因参数偏离导致的反应效率下降与能耗上升,较传统手动控制降低5%-8%的能耗。

(3)余热梯级利用与热泵技术集成:构建多等级余热回收系统,将合成反应产生的高温余热(400 $^{\circ}\text{C}$ 以上)用于原料气预热与高压蒸汽制备,中温余热(200-400 $^{\circ}\text{C}$ )用于锅炉给水加热,低温余热(100-200 $^{\circ}\text{C}$ )通过热泵技术提升温度后用于工艺伴热或厂区供暖。采用热管换热器、板式换热器等高效换热设备,提升余热回收效率至85%以上;引入吸收式热泵,实现低品位余热的资源化利用,进一步降低辅助能源消耗。

#### 3.3 新型催化剂与反应器设计

(1)低温活性催化剂研发与应用:推广使用钨基、钴基等新型低温催化剂,替代传统铁基催化剂。此类催化剂在250-350 $^{\circ}\text{C}$ 的低温条件下即可展现优异活性,大幅降低反应所需的升温能耗;同时,其抗毒性更强,可减少原料气净化的能耗投入。实验数据表明,钨基催化剂的反应活化能较铁基催化剂降低30%以上,在相同产率下可降低反应温度50-80 $^{\circ}\text{C}$ ,对应能耗减少8%-12%。(2)微通道反应器提升传质效率:采用微通道反应器替代传统固定床合成塔,其内部微小通道(尺寸10-100 $\mu\text{m}$ )可大幅增加气固接触面积,提升传质与传热效率,使反应转化率从传统工艺的10%-20%提升至25%-30%。同时,微通道反应器的高效传热特性可快速移除反应热,避免局部过热导致的催化剂失活,减少循环系统的负荷与能耗。此外,反应器体积小,可降低设备投资与占地面积,进一步优化系统能效<sup>[4]</sup>。

#### 3.4 数字化与智能化改造

(1)AI优化工艺参数实时调控:构建基于人工智能算法的参数优化模型,通过大数据分析历史生产数据,挖掘不同工况下的最优参数组合。模型可实时预测原料组分变化、设备运行状态对能耗的影响,提前调整工艺参数,实现动态优化。例如,AI系统可根据天然气组分波动,自动调整蒸汽转化的水碳比,确保转化效率最优,较传统控制系统进一步降低3%-5%的能耗<sup>[5]</sup>。(2)数字孪生技术模拟能耗场景:搭建合成氨工艺的数字孪生模型,实现物理系统与虚拟系统的实时映射。通过模型模拟不同操作参数、设备状态下的能耗场景,精准识别能耗瓶颈;在改造方案实施前进行虚拟验证,优化改造路径,避免盲目改造导致的资源浪费。同时,利用数字孪生模型进行设备故障预警与预测性维护,减少因设备故障导致的能耗激增,提升生产过程的稳定性与节能

效果。

#### 4 化工合成氨工艺的挑战与未来展望

##### 4.1 技术挑战

(1) 低温工艺的设备耐腐蚀性问题: 低能耗的低温低压合成工艺中, 反应体系易形成冷凝水与微量氨的混合介质, 对设备材质产生强烈腐蚀, 尤其在设备焊接接头、密封面等薄弱部位, 易发生应力腐蚀开裂。现有耐腐蚀合金材质成本高昂, 大幅增加设备投资; 而普通材质的防腐涂层在低温、高压工况下易脱落失效, 难以长期稳定运行, 成为制约低温工艺规模化推广的核心技术瓶颈。(2) 催化剂寿命与成本平衡: 新型低温催化剂(如钌基催化剂)虽能降低反应能耗, 但存在制备成本高、寿命短的问题。钌基催化剂的贵金属含量使其成本较传统铁基催化剂高出5-8倍, 且在含微量杂质的原料气中易中毒失活, 使用寿命仅为铁基催化剂的1/2-2/3。若要保证催化效率, 需频繁更换催化剂, 进一步推高生产运维成本, 如何在提升催化剂性能的同时降低成本、延长寿命, 是行业亟待解决的关键问题。

##### 4.2 政策与市场驱动

(1) 碳交易机制对节能改造的推动: 随着全球碳交易市场的逐步完善, 高耗能的合成氨企业面临碳减排压力与碳成本支出双重挑战。碳价的提升使企业节能改造的经济效益显著增强, 通过采用低能耗工艺、余热回收等技术降低碳排放, 不仅可减少碳配额购买支出, 还能将富余碳配额出售获利, 政策导向与市场利益共同推动企业加快节能改造步伐。(2) 绿色氢能替代传统原料的潜力: 在“双碳”目标驱动下, 绿色氢能(可再生能源制氢)替代传统化石能源制氢成为行业发展趋势。绿色氢能制备的原料气无碳排放, 可实现合成氨全生命周期的低碳化, 契合绿色化工发展要求。当前制约其推广的核心是绿色氢能成本偏高, 随着光伏、风电等可再生能源发电成本下降, 绿色氢能替代潜力将逐步释放, 为合成氨产业绿色转型提供新路径。

##### 4.3 未来发展方向

(1) 氢能耦合合成氨技术: 绿氨生产将可再生能源制氢与合成氨工艺深度耦合, 通过电解水制氢获得绿色氢能, 再与氮气合成氨, 全程无化石能源消耗与碳排放。绿氨不仅可作为化肥原料, 还能作为氢能载体实现跨区域储运, 兼具农业价值与能源属性, 有望成为未来合成氨产业的主流发展方向, 助力能源与农业领域的双重脱碳。

(2) 人工智能与工业互联网深度融合: 未来合成氨工厂将朝着全流程智能化方向发展, 通过人工智能与工业互联网的深度融合, 构建覆盖生产、运维、能耗管理的全链路智能系统。利用工业互联网实现设备状态、工艺参数的全面感知与数据互通, 借助人工智能算法进行精准预测与智能调控, 优化生产全流程能耗, 提升设备运维效率, 推动合成氨产业向高效、低碳、智能化转型。

##### 结束语

化工合成氨工艺的节能改造是一项兼具紧迫性与长远意义的工作。通过原料结构优化、设备升级、新型催化剂应用以及数字化智能化改造等措施, 能够有效降低能耗、提升生产效率, 减少对环境的影响。未来, 随着技术的持续创新、政策的有力引导以及市场需求的推动, 化工合成氨产业必将朝着更加绿色、高效、智能的方向迈进, 为全球能源转型与可持续发展贡献关键力量。

##### 参考文献

- [1]张华,王明.化工合成氨工艺节能改造措施研究[J].化学工程,2022(5):48-54.
- [2]李宇,刘维.催化剂改良在化工合成氨工艺中的应用及研究进展[J].化学与生物工程,2021(3):37-39.
- [3]解洪伟.煤化工合成氨工艺分析及节能优化措施[J].化工管理,2023,(17):142-144.
- [4]张伟辉.无烟煤制合成氨工艺技术分析与研究[J].山西化工,2023,43(04):86-88.
- [5]明宇.天源山西化工合成氨装置醇烃化改醇烷化工艺的优劣势及经济性分析[J].中氮肥,2023,(02):18-23.