

# 基于绿色化学的煤制合成氨煤气化流程优化设计

樊天泽 张晓晶

甘肃能化金昌能源化工开发有限公司 甘肃金昌 737100

**摘要:** 煤制合成氨的煤气化流程虽然在技术上有一定的发展,但仍存在一系列挑战,尤其是在能源效率、环境污染控制、煤气纯度和设备维护等方面。为了提高煤制合成氨的经济性和环保性,技术创新和新型煤气化工艺的优化,以及二氧化碳捕集等环保措施的完善,是未来发展的关键。本文基于绿色化学的煤制合成氨煤气化流程优化设计进行分析,以供参考。

**关键词:** 绿色化学; 煤制合成氨; 煤气化流程; 优化设计

## 一、煤制合成氨煤气化流程现存问题

### 1. 煤气化过程中的低效率和高能耗

煤气化是一个高度复杂的过程,涉及到煤的气化、还原、转化等多个阶段。虽然新型气化技术已经提高了气化效率,但由于煤本身的成分差异和气化过程中的热量损失,整体的能效仍然不够理想。特别是低阶煤的气化过程中,由于煤的水分和灰分较高,气化效率进一步降低,导致煤气化过程中消耗的能量较多。气化过程中需要消耗大量的热能,尤其是在处理低阶煤时。部分煤的气化过程不完全,气化产物中含有未完全转化的有机物和残余固体物。

### 2. 高硫、氮等杂质的影响

煤炭中含有较高的硫、氮、重金属等杂质,这些成分在煤气化过程中会对合成气的质量产生负面影响。例如,硫会转化为硫化氢( $H_2S$ ),氮会形成氨气和氮氧化物( $NO_x$ ),这些物质不仅会影响合成氨的质量,还会对设备造成腐蚀,增加后期处理成本。高硫和氮含量导致气体中的有害物质较多,需进行额外的脱硫、脱氮处理。硫化物和氮化物的存在可能影响合成氨的反应效率和产品质量。

### 3. 气化反应中废气和副产品的处理

在煤气化过程中,除合成气外,还会产生大量的废气和副产品,如二氧化碳、硫化氢、氮氧化物等,这些副产物若未经妥善处理,会对环境造成严重污染。二氧化碳排放量大,导致温室气体的增加。废气和副产物的治理技术尚不成熟,排放控制成本较高。煤气化装置通常在高温、高压和腐蚀性气氛下运行,设备的使用寿命受到腐蚀和磨损的影响较大,尤其是煤中含有硫和其他腐蚀性物质时。设备的损耗和维护成本高昂,且设备的

停机时间和维护周期较长。煤气化过程中产生的硫化氢和其他腐蚀性物质会加速设备的磨损。由于设备的复杂性和高腐蚀性,维护和更换设备的成本较高。

### 4. 煤气的纯度和稳定性

煤气化过程中产生的合成气可能会含有不稳定的成分,如一氧化碳、氢气、甲烷等。这些成分浓度和纯度波动较大,可能影响后续的合成氨反应,甚至降低合成氨的产量和质量。稳定且高纯度的气体对于高效合成氨生产至关重要。合成气成分的不稳定性影响合成氨反应的效率。高纯度合成气的需求较高,产生过程中的气体成分波动可能导致反应难以控制。低阶煤(如褐煤、亚煤)由于含水量和灰分较高,气化难度较大。这类煤炭气化时需要更高的温度和更多的能源投入来提高气化效率。此外,低阶煤中的挥发分较高,气化过程中可能导致气化炉内的积碳现象,增加了气化过程的难度和成本。低阶煤的气化效率较低,气化过程容易受到煤种的影响。低阶煤气化时可能发生积碳现象,导致气化设备堵塞和效率下降。

### 5. 合成氨生产的高环境成本

尽管煤气化提供了一种较为廉价的合成氨原料来源,但整个煤制合成氨的生产过程中会产生大量的温室气体排放。煤炭的使用不仅会增加二氧化碳的排放,还可能带来其他环境污染问题,尤其是在煤气化过程中没有有效的碳捕捉技术的情况下。煤制合成氨的生产过程中,二氧化碳排放较高。除了二氧化碳,气化过程中还会产生氮氧化物、硫化氢等污染物。尽管煤制合成氨煤气化技术在实验室和小规模试验中已经取得一定的成果,但其商业化应用仍面临技术和经济上的挑战。高昂的初期投资、技术研发投入以及后期的运行成本,仍然是推动

这一技术大规模应用的障碍。煤气化装置和相关配套设施的建设成本高，且技术复杂。气化技术的成熟度和稳定性仍然是制约其广泛应用的关键因素。

## 二、基于绿色化学的煤制合成氨煤气化流程优化设计策略

### 1. 绿色气化技术选择

煤气化技术是煤制合成氨的核心环节，在这一过程中，煤被转化为合成气（主要由一氧化碳和氢气组成），作为合成氨生产的原料。为了提高煤气化过程的绿色性，联合循环气化将煤气化与发电系统结合的技术，利用气化过程产生的合成气驱动发电机发电。这样不仅提升了气化效率，还通过电力生产来提高整体能源效率。此外，IGCC系统通常具备较好的污染控制能力，可以有效减少CO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的排放。高温气化技术通过提高气化反应温度来增强气化效率。高温可以促进煤气化反应的深入进行，减少焦炭和未反应煤的生成，从而提高煤的转化率和气化效率。同时，高温条件下气化反应会产生更多的合成气，减少不完全燃烧的副产物。自热气化技术通过利用气化过程中产生的热量来维持气化反应所需的温度，无需外部能源输入，从而提高能源利用效率，减少能耗。这种方法能够降低操作成本，并且减少对外部能源的依赖，进一步实现绿色化学目标。

### 2. 煤气化废气与副产物的治理

煤气化过程中会产生大量的有害物质，其中二氧化碳（CO<sub>2</sub>）、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）和硫化氢（H<sub>2</sub>S）是主要的废气成分。为了实现绿色气化，减少这些有害物质的排放至关重要，二氧化碳捕集和利用技术将二氧化碳从气化过程中捕集并加以利用的技术。捕集到的二氧化碳可以进一步转化为有用的化学品，如甲醇、尿素等，从而实现资源的再利用。选择性催化还原方法通过催化剂的作用，将NO<sub>x</sub>转化为氮气和水，降低氮氧化物的排放。高效脱硫技术如胺吸收法、干法脱硫和湿法脱硫等，可以去除煤气化过程中产生的硫化氢（H<sub>2</sub>S），减少对环境的污染。

### 3. 合成气优化与处理

合成氨的生产需要合成气中氢气（H<sub>2</sub>）与一氧化碳（CO）的比值达到理想状态，以提高反应效率。绿色化学优化设计通过调节气化过程中的气体组成，确保达到所需比值。在此过程中，合成气中的杂质（如硫化物、氮化物和水分）可能对氨合成过程产生负面影响，因此需要采取高效的气体净化技术。变温吸附法（VSA）是一种利用吸附剂在不同温度下吸附和解吸气体的特性来

去除合成气中的杂质的方法。吸附剂对气体的选择性吸附使其能够有效地去除合成气中的硫化物、氮化物、水分等杂质。通过调节温度，可以使吸附剂在低温下吸附杂质，在高温下释放杂质，从而实现气体的净化。常用的吸附剂包括活性炭、分子筛和硅胶等，它们具有较高的吸附能力，能有效去除合成气中的有害物质。

### 4. 催化剂的绿色创新

绿色催化剂的创新旨在减少高温、高压和有害化学品的使用，并提高反应的效率和选择性。特别是在合成氨的合成过程中，催化剂的改进是降低能源消耗的关键因素。通过开发新型催化剂，使得反应能够在较低的温度和压力下进行，减少能源消耗。通过优化催化剂的结构，提高其催化活性和使用寿命，从而提高合成氨过程的经济性和可持续性。结合氢化和氨合成反应的双功能催化剂，不仅提高了反应速率和选择性，还能有效减少副产物的生成，进一步提高了氨合成的整体效率。

### 5. 能源效率和热能回收

#### （1）废热回收与热电联产

煤气化和氨合成过程中会产生大量废热，这些热能如果能被有效回收，将有助于提升系统的能源效率。热电联产系统通过热电联产技术，将废热转化为电力，不仅为工艺提供所需的能量，还可以将多余的电力供应到外部电网。这不仅提高了资源的利用率，还减少了对外部电力供应的依赖。热电联产系统通常包括蒸汽发生器、汽轮机和发电机等设备，通过蒸汽驱动汽轮机发电，同时为工艺流程提供热能。这样不仅提高了能源的综合利用效率，也减少了对燃料的消耗。

#### （2）优化反应条件

绿色化学的设计思路之一是优化反应条件，减少能源消耗。在煤制合成氨过程中，温度和压力是影响能源消耗的关键因素。通过创新催化剂和优化反应路径，可以在较低的温度和压力下实现合成氨反应，从而降低能源消耗。例如，采用低温催化剂或者双功能催化剂，能够在温和的条件下高效完成氨合成反应。对反应器和设备的热能管理，减少能源的浪费。例如，在反应过程中回收热量并将其用于其他工艺环节或加热输入物料，这样可以进一步提高系统的热效率。

#### （3）可再生能源的应用

在传统化石能源基础上，绿色化学设计还可以通过引入可再生能源来进一步减少能源消耗并降低碳足迹。利用太阳能进行热能收集和电力生产，可以为部分煤气化和氨合成过程提供清洁能源，减少对煤炭等化石能源

的依赖。风能可以用于发电，尤其是在电力需求较高的时段，风电可以作为煤制合成氨过程中的辅助能源来源。可再生能源的结合使用，不仅有助于降低化石能源的消耗，还能减少温室气体的排放，推动整个煤化工产业向更加绿色、可持续发展的方向发展。

## 6. 水资源回收与管理

煤气化过程和氨合成反应会消耗大量水资源，绿色化学优化设计应注重水资源的回收与再利用。例如，通过反渗透膜技术或蒸发冷凝技术回收废水，确保水资源的高效使用。采用先进的水处理技术实现零排放，避免将废水排入环境中造成污染。绿色化学设计可以探索将生物质与煤混合进行气化，这不仅有助于减少煤的使用量，还能够降低二氧化碳排放。例如，将农业废料、木屑、废弃物等生物质与煤一起气化，通过调节混合比例来提高合成氨的生产效率并减少温室气体排放。为了确保煤制合成氨过程符合绿色化学原则，必须进行全过程的生命周期分析。LCA可以评估从煤炭开采、气化、氨合成到废弃物处理的每个环节对环境的影响，包括能源消耗、二氧化碳排放、水使用、废物产生等，从而帮助优化整个过程的绿色性。

## 7. 智能化与自动化控制

### (1) 实时监控与动态调整

物联网技术通过传感器和智能设备实时采集煤气化过程中的温度、压力、流量、气体成分等各项关键数据。物联网技术使得数据采集和传输更加精准与高效，系统能够实时掌握生产状态，及时发现任何异常，并快速响应。采集的实时数据会通过大数据平台进行分析和处理，找出数据之间的关联性和规律。例如，分析气化过程中的气体组成变化，预测可能发生的反应偏差或设备故障，进而进行预警和优化。大数据分析还可以帮助优化生产参数，如温度和压力，最大化反应效率，并降低不必要的能源消耗。AI算法可以基于实时数据和历史数据，优化煤气化过程的各项操作条件，自动调节反应条件，以实现最优的能源利用和最小的排放。AI还能够根据实时反馈，预测设备故障，制定最适合的维护和调度策略，确保生产的稳定性和安全性。

### (2) 自动化控制系统

自动化控制系统的应用，使得生产过程中的许多操作可以实现无人值守，减少人为干预带来的错误，确保

生产过程的稳定性。自动化系统可以控制煤气化过程中的反应器温度、气体流量和反应时间等变量，自动调节操作条件以实现最佳气化效率。例如，在煤气化过程中，通过自动化系统调整氧气和蒸汽的比率，使气化反应更加完全，生成的合成气质量更高。自动化系统能精确控制合成氨反应所需的气体比例、温度、压力等因素，保证合成氨反应的最佳条件。系统还能够根据实时数据动态调整反应器中的气体输入，避免因反应条件不适合而导致的波动。废气处理环节同样能通过自动化控制系统进行优化。系统可以实时监控废气中的有害物质浓度，并根据排放标准自动调整废气处理设备的工作状态。例如，自动控制催化转化装置或吸附装置的工作效率，确保废气排放符合环保要求。

### (3) 减少人为错误和能源浪费

减少人为错误：自动化控制系统通过消除人工操作中可能出现的误差，确保各项参数始终处于理想状态，避免了人为失误带来的损失。智能化系统能够实时调整反应条件和设备运行状态，以最优化的方式使用能源，避免过度消耗。系统可以根据生产需求自动调整能源供应，例如根据气化反应和合成氨反应的负荷自动调节蒸汽或电力的使用量，减少不必要的能源浪费。通过智能化监控和自动化控制，系统能够在出现潜在风险或异常时迅速作出反应。例如当检测到温度、压力等关键参数偏离安全范围时，系统可以自动调整或停机保护，避免可能的设备损坏或安全事故。

## 总结

基于绿色化学的煤制合成氨煤气化流程优化设计，不仅关注环保和资源利用效率，还力求降低能源消耗、减少有害排放并提升经济效益。通过引入先进的气化技术、催化剂创新、废气治理、废热回收等绿色设计方法，可以实现煤制合成氨的可持续发展。这种优化设计不仅符合绿色化学的原则，也为煤化工行业的转型提供了创新路径。

## 参考文献

- [1] 尉美玲. 甲醇厂气化炉常见故障及处理措施[J]. 机械管理开发, 2023, 38(10): 202-204.
- [2] 胡晓松. 煤气化工艺中节能减排技术的研究和应用[J]. 山西化工, 2023, 43(06): 197-199.