

# 化工合成氨工艺分析及节能改造措施

祁维礼

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：**合成氨作为煤化工产业的关键产品，其生产工艺的优化与节能改造对行业可持续发展意义深远。当前化工合成氨面临能源消耗高、设备效率低及工艺技术落后等问题。通过深入剖析合成氨工艺原理，针对性提出优化原料气制备、改进设备性能、采用先进工艺技术及加强余热回收利用等改造措施，可有效降低能耗，提升生产效率，推动煤化工产业向绿色、高效方向转型升级，实现经济效益与环境效益的双赢。

**关键词：**化工合成氨；工艺；节能改造；措施

## 引言

在煤化工领域，合成氨是重要的基础化工产品，广泛应用于化肥生产及众多化工产品的合成。然而，传统合成氨工艺存在能源消耗大、设备老化、技术滞后等问题，不仅增加生产成本，还对环境造成较大压力。随着能源短缺与环保要求的日益严苛，对合成氨工艺进行深入分析与节能改造迫在眉睫。本文旨在探讨化工合成氨工艺的原理，剖析现存问题，并提出切实可行的节能改造措施，为煤化工行业绿色发展提供参考。

## 1 化工合成氨工艺原理

化工合成氨工艺在煤化工领域中占据重要地位，其核心是以煤为原料通过一系列复杂化学反应实现氨的生产。煤先进入气化炉，在高温高压条件下与氧气和水蒸气发生气化反应，这一过程将固态的煤转化为以一氧化碳和氢气为主要成分的合成气，同时产生少量二氧化碳、甲烷等气体。如在固定床气化炉内，煤与气化剂逆向接触，发生氧化、还原等反应，生成的合成气成分与煤质、气化剂配比密切相关。从气化炉产出的合成气需进行净化处理以满足后续合成氨的要求。第一，通过变换反应，在催化剂作用下，合成气中的一氧化碳与水蒸气反应生成氢气和二氧化碳，从而提高氢气含量并降低一氧化碳浓度。第二，采用物理吸收或化学吸收的方法脱除二氧化碳，常用的物理吸收法如低温甲醇洗，利用甲醇在低温高压下对酸性气体的良好吸收性能，将二氧化碳从合成气中分离；化学吸收法则如热钾碱法，借助碳酸钾溶液与二氧化碳的化学反应实现脱除。还需通过脱硫工艺去除合成气中的硫化氢等硫化物，防止后续合成氨催化剂中毒，氧化锌脱硫技术便是通过氧化锌与硫化氢反应生成硫化锌和水，达到深度脱硫的目的。净化后的合成气进入合成塔，在高温（约400-500°C）、高压（15-30MPa）以及铁基催化剂作用下，氢气和氮气发生

化合反应生成氨。该反应为可逆放热反应，根据化学平衡原理，适当提高压力、降低温度有利于氨的生成，但实际生产中需综合考虑设备耐压能力和反应速率，选择适宜的操作条件。生成的氨经冷却液化从合成气中分离出来，未反应的氢气和氮气循环回合成塔继续参与反应，以提高原料利用率，实现合成氨工艺的连续高效运行。

## 2 化工合成氨工艺现存问题分析

### 2.1 能源消耗高

化工合成氨工艺中，能源消耗高是一个突出问题。在以煤为主要原料的合成氨过程中，造气环节需要将煤炭转化为合成气，这一过程涉及到煤炭的气化反应，通常需要在高温条件下进行。为了维持反应所需的高温环境，需要消耗大量的能源，且煤炭气化过程中，部分能量会以热辐射、废气余热等形式散失，导致能源利用效率较低。例如，传统的固定床间歇式气化炉，在吹风阶段将空气通入炉内使煤炭燃烧以积蓄热量，这部分热量在后续制气阶段并不能被充分利用，大量能量随吹风气排放而损失。据相关数据统计，该类型气化炉的能源利用率仅在60%-70%之间。在合成氨反应阶段，由于反应条件苛刻，通常需要在高温（400-500°C）、高压（15-30MPa）下进行，这使得压缩机、循环泵等设备需要消耗大量电能来维持系统的压力和物料循环。合成氨反应是一个可逆反应，为了提高氨的转化率，往往需要过量的原料气循环，这进一步增加了能源消耗。在后续的气体净化、氨分离等工序中，同样需要消耗大量能量用于加热、冷却、压缩等操作。例如，在脱除二氧化碳工序中，采用热钾碱法时，需要通过加热溶液来解吸二氧化碳，这一过程的能耗占整个合成氨工艺能耗的较大比例<sup>[1]</sup>。

### 2.2 设备效率低

化工合成氨工艺中的设备效率问题较为显著。在造气设备方面，以固定床造气炉为例，其采用间歇式加煤

和制气方式，生产过程存在明显的周期性。在加煤过程中，炉内温度、压力会出现波动，影响气化反应的稳定性，导致气化效率不高。炉内的煤炭与气化剂的接触并不均匀，部分煤炭可能无法充分反应就被排出，造成原料浪费，也降低了整体的设备效率。固定床造气炉的炉篦、炉衬等部件容易受到高温、高压以及煤炭颗粒的磨损，随着运行时间的增加，设备的泄漏点增多，不仅影响生产的连续性，还会使气体的有效利用率降低。在合成塔设备方面，虽然经过多年的发展和改进，但部分合成塔仍存在一些问题影响其效率。例如，部分合成塔内的催化剂装填方式不够合理，导致气体在塔内的分布不均匀，部分区域的催化剂不能充分发挥作用，降低了氨的合成效率。合成塔的换热结构设计可能存在缺陷，使得反应产生的热量不能及时有效地移出，影响反应的平衡和速率。随着合成塔运行时间的增长，催化剂会逐渐失活，活性降低，这也会导致合成塔的生产效率下降，为了维持生产能力，就需要频繁更换催化剂，增加了生产成本和设备的停运时间。在气体压缩设备方面，如往复式压缩机，其易损件较多，运行过程中的机械摩擦损失较大，导致压缩机的能耗高且维修频繁，影响了设备的整体运行效率和生产的连续性。

### 2.3 工艺技术落后

在煤化工合成氨领域，部分工艺技术仍较为落后。从造气工艺来看，固定床间歇式气化工艺在一些小型合成氨企业中仍广泛应用。这种工艺技术成熟度较高，但缺点也十分明显。其采用间歇式操作，吹风、制气过程交替进行，导致生产过程不连续，且原料煤的利用率较低，通常只有60%-70%。该工艺对原料煤的品质要求较为苛刻，只能使用特定的无烟煤或焦炭，限制了原料的选择范围。固定床间歇式气化工艺在生产过程中会产生大量的吹风气和废渣，吹风气中含有一定量的可燃气体，但由于回收技术难度较大或成本较高，往往直接排放，既浪费能源又污染环境；废渣中也含有一定量的残碳，未得到充分利用。在气体净化工艺方面，一些企业仍采用较为传统的脱硫、脱碳工艺。例如，在脱硫工艺中，采用湿法脱硫时，部分工艺存在脱硫效率低、副反应多、溶液再生能耗高等问题。传统的脱硫工艺对于低浓度含硫气体的处理效果不佳，难以满足日益严格的环保要求。在脱碳工艺中，热钾碱法虽然应用广泛，但该工艺需要消耗大量的蒸汽来进行溶液的再生，能耗较高。传统的气体精制工艺，如甲烷化法，虽然能够将气体中的碳氧化物脱除到较低水平，但会消耗大量的氢气，增加了原料成本，且会使合成气中的惰性气体含量

增加，影响氨合成反应的效率。在氨合成工艺方面，部分企业仍使用传统的铁基催化剂，其活性相对较低，需要在较高的温度和压力下才能保证一定的氨合成率，这不仅增加了能源消耗，还对设备的材质和耐压性能提出了更高要求。与新型的钌基催化剂相比，铁基催化剂在相同条件下的氨合成效率明显较低，限制了合成氨工艺的整体技术水平提升<sup>[2]</sup>。

## 3 化工合成氨工艺节能改造措施

### 3.1 优化原料气制备工艺

(1) 在煤气化环节，选用先进的水煤浆气化技术，将煤研磨成粒度均匀的水煤浆，通过高压喷嘴与氧气在气化炉内进行高效反应，相较于传统固定床气化，可显著提高碳转化率至98%以上，减少原料煤的浪费。优化气化炉的内部结构设计，增加激冷室与水洗塔的协同作用，在降低合成气温度的同时，有效脱除其中的飞灰和杂质，避免后续工序因气体杂质导致的能量损耗。(2) 针对原料气中氢气和一氧化碳的比例调整，采用新型变换催化剂。例如，选用高活性的铁-铬系变换催化剂，在较低的反应温度下即可实现一氧化碳向二氧化碳和氢气的高效转化，降低变换反应所需的蒸汽消耗。通过精确控制变换反应的水气比，使氢气和一氧化碳的比例更符合后续合成氨工艺要求，减少气体循环过程中的能量消耗。(3) 在脱硫脱碳工艺方面，采用低温甲醇洗技术。利用甲醇在低温条件下对酸性气体（硫化氢、二氧化碳等）的高溶解度特性，高效脱除原料气中的杂质。相较于传统的化学吸收法，低温甲醇洗技术不仅净化效果更好，而且甲醇溶剂的再生能耗低，可通过多级闪蒸和热再生相结合的方式，最大限度回收甲醇溶剂的能量，降低整个原料气制备过程的能耗。

### 3.2 改进设备性能

(1) 对合成氨装置中的关键设备压缩机进行升级改造，采用离心式压缩机替代传统的往复式压缩机。离心式压缩机具有流量大、转速高、运行平稳等优点，通过优化叶轮设计和扩压器结构，提高压缩机的等温效率，降低压缩过程中的功耗。配备先进的变频调速系统，根据生产负荷实时调整压缩机的转速，避免设备在低负荷运行时的能源浪费。(2) 对氨合成塔进行结构优化，采用径向合成塔替代传统的轴向合成塔。径向合成塔内气体呈径向流动，能够有效降低床层阻力，减少循环压缩机的功耗。在塔内装填高活性、高选择性的氨合成催化剂，如钌基催化剂，可在较低的温度和压力下实现氨的合成，降低合成反应所需的能量输入。对合成塔的内件进行改进，增加气体分布器和热交换器的换热面积，

提高反应热的回收效率。（3）对换热器进行强化传热改造，采用高效的螺旋折流板换热器或板翅式换热器替代传统的管壳式换热器。这些新型换热器具有传热系数高、结构紧凑等特点，能够有效提高热量传递效率，减少换热过程中的温差损失。通过优化换热器的布置方式，精心规划使其形成高效路径，实现冷热流体的逆流换热，进一步提高热能的回收利用率，降低装置的整体能耗<sup>[3]</sup>。

### 3.3 采用先进工艺技术

（1）引入低压氨合成工艺，相较于传统的中高压合成工艺，低压氨合成工艺在10-15MPa的压力下即可实现较高的氨合成率。通过采用新型的氨合成催化剂和优化合成塔内件结构，降低反应所需的活化能，减少压缩气体所需的能量。低压工艺可降低设备的耐压要求，减少设备投资成本和维护费用，降低整个合成氨系统的能耗。（2）应用膜分离技术进行氢氮气体的精制和回收。在合成氨尾气处理过程中，采用中空纤维膜分离器，利用不同气体在膜材料中的渗透速率差异，高效分离出氢气和氮气，并将其返回合成系统循环利用。膜分离技术具有操作简单、能耗低、分离效率高等优点，能够有效减少合成氨过程中氢气和氮气的损失，提高原料气的利用率，降低生产成本。（3）采用新型的组合工艺，将煤气化、变换、净化、合成等工序进行优化集成。例如，将煤气化产生的粗合成气直接送入变换和净化装置，省去中间的冷却和再加热过程，减少能量损失。将合成工序产生的余热用于原料气的预热和其他工艺环节，实现能量的梯级利用，提高整个合成氨工艺的能源利用效率，降低综合能耗。

### 3.4 加强余热回收利用

（1）在煤气化过程中，气化炉出口的高温合成气携带大量显热。通过设置废热锅炉，将高温合成气的热量传递给水，产生高压蒸汽。这些高压蒸汽可用于驱动合成氨装置中的蒸汽透平，带动压缩机、泵等设备运转，替代部分电能消耗。对废热锅炉产生的蒸汽进行合理分

配，根据不同工艺环节对蒸汽参数的需求，实现蒸汽的分级利用，提高蒸汽的利用效率。（2）氨合成反应是一个放热反应，合成塔出口的高温气体中含有大量反应热。在合成塔后设置高效的热交换器，将合成气的热量传递给进入合成塔的原料气，实现原料气的预热，降低合成反应的外部供热需求。还可利用合成气的余热加热锅炉给水，产生中压蒸汽，用于其他工艺环节或发电，实现能量的二次回收利用。（3）在变换、脱硫脱碳等工艺过程中，也会产生大量的余热。通过设置余热回收装置，将这些余热用于预热原料气、加热工艺用水或提供生活用热等。例如，利用变换气的余热加热脱硫脱碳工序中的贫液，降低贫液再生过程中的蒸汽消耗。对余热回收系统进行精细化管理，优化余热回收流程和设备运行参数，确保余热得到最大限度的回收利用，提高整个合成氨装置的能源利用效率<sup>[4]</sup>。

### 结语

综上所述，化工合成氨工艺节能改造是推动煤化工产业高质量发展的必然选择。针对当前合成氨工艺中能源消耗高、设备效率低、工艺技术落后等问题，需从原料气制备、设备性能、工艺技术及余热回收等多维度实施改造。通过优化工艺流程、引入先进技术装备，可有效降低生产成本，减少碳排放，增强企业竞争力。未来，合成氨行业应持续探索节能技术创新，助力煤化工产业向绿色低碳方向转型升级。

### 参考文献

- [1]李兴鹏.化工合成氨工艺分析及节能优化[J].中国化工贸易,2021(19):81-82.
- [2]郝林燕.关于合成氨工艺的分析及节能改造措施[J].中国化工贸易,2020,12(19):167-168.
- [3]赵梅昌.浅谈合成氨工艺分析及节能改造[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(3):152-154.
- [4]武楷淳.合成氨工艺及节能改造措施[J].中国化工贸易,2021(36):112-114.