

煤化工合成氨工艺分析及节能优化措施及经济性评价

苑光辉（潍坊市工业发展促进中心，山东 潍坊 261041）

摘要：本文从煤化工合成氨工艺的角度出发，对该工艺中的节能优化方法进行深度研究。先简要介绍了煤气化工业的运行原理和煤化工生产合成氨的工艺流程，然后着重分析了煤化工合成氨中的三种关键生产工艺，并由此提出了四种不同的工艺节能优化措施，并以某企业为例做出节能优化的经济性评价与分析，由此明确分子筛干燥系统、能量集成技术等在合成氨工艺中的应用优势。

关键词：煤气化工业；合成氨；关键生产工艺；节能优化；经济性评价

中图分类号：TQ113.2 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)016-0085-03

Analysis of Coal Chemical Synthesis Ammonia Process, Energy saving Optimization Measures, and Economic Evaluation

Yuan Guanghui (Weifang Industrial Development Promotion Center, Weifang Shandong 261041, China)

Abstract: This article conducts in-depth research on energy-saving optimization methods in the coal chemical synthesis of ammonia process. Firstly, the operating principle of coal gasification industry and the process flow of coal chemical production of synthetic ammonia were briefly introduced. Then, three key production processes in coal chemical synthetic ammonia were analyzed, and four different energy-saving optimization measures were proposed. Taking a certain enterprise as an example, an economic evaluation and analysis of energy-saving optimization were made, clarifying the application advantages of molecular sieve drying system, energy integration technology, etc. in synthetic ammonia process.

Keywords: coal gasification industry; Synthetic ammonia; Key production processes; Energy saving optimization; Economic evaluation

1 煤气化工业的运行原理

煤气化工业的实际运行原理为：在气化作用的影响下，煤炭会与氧气、水蒸气等气化剂发生燃烧、热解、气化等一系列化学反应，由此实现煤炭由固体状态向可燃性气体状态的转变。

燃烧反应能够为整个煤炭气化过程提供足够的热量能源，若煤炭能够与氧气充分接触，则会在氧化反应过程中实现完全燃烧，并生成二氧化碳；若煤炭只与少量氧气接触，则煤炭将会发生不完全燃烧反应，此时所释放的热量明显减少，且生成物为一氧化碳。

热解反应是指煤炭在缺氧条件或隔绝空气状态下所发生的受热分解过程，所生成的热解产物与所使用煤炭种类、加热速率、热解工艺等之间存在直接相关性。

气化反应是指热解过程中生成的挥发性物质，会在持续高温环境的作用下生成一氧化碳、水蒸气、二氧化碳等大量气态物质，在后续再次加热处理与冷却处理的工作中，这些气态物质将会转变为合成氨。

2 煤化工生产合成氨的具体工艺流程

2.1 原料气制取

原料气制取大多采用煤气化方法，使用水蒸气、氧气和特定催化剂来对煤炭进行持续高温加热处理，以保证煤炭能够与催化剂发生完全燃烧反应，在生成

氢气和一氧化碳气体后再采用二段蒸汽方法，利用蒸汽的能量和反应特性制备能够满足合成氨工艺需求的合成气体。

2.2 原料气净化

原料器制备工艺所得到的合成气体内含有较多杂质，需要分别对这些杂质进行净化处理。

比如，使用耐硫变化催化剂与一氧化碳杂质进行融合，以高效的变换反应来实现一氧化碳的转化；使用理化吸收法或低温甲醇洗法对原料气进行脱硫处理，防止原料气中的硫化物影响催化剂的使用活性和合成氨的反应速率与产率；使用溶液吸收法去除原料气中的二氧化碳杂质，二氧化碳会被溶液完全吸收，经过再生处理后排放。

2.3 原料气精炼

原料气精炼环节的作用是再次对原料器中的杂质进行彻底清除，可以使用铜氨液吸收法来降低一氧化碳的含量，更适用于生产规模较小的一般合成氨企业中；甲烷化法则是使用氢气与一氧化碳和二氧化碳的反应将二者完全去除，更适用于对原料气纯度要求较高的合成氨制备企业中。

2.4 合成

氨的合成需要具备高温、高压和催化剂共同作用的合成条件，同时还需要在高温条件下适当加快反应

速率，并将操作压力控制在 15–30MPa 之间以保证氨的合成反应能够更快达到反应平衡状态，另外还需要使用氢气与氮气循环系统来完成合成氨制备。

2.5 分离

氨的分离主要通过冷凝分离和蒸散分离等方式实现，既能将合成塔生成的氨从反应气体中完全分离出来，又能保证未参与反应的氢气和氮气能够得到循环利用。

3 煤化工合成氨的关键生产工艺

3.1 焦煤制取氢气

作为一种最常见的合成氨技术，焦煤制取氢气应严格按照上述提到的原料气制取、原料气净化、原料气精炼、合成、分离工序进行，其中涉及多种更具稳定性和实用性的工艺方法，如低温甲醇洗、变压吸附制氢工艺等。工艺要点在于：严格控制所使用催化剂的活性、反应条件对氢气中氧和水分的脱除程度影响；如何对已经经过冷凝降温处理的产物进行分离提纯等。

3.2 天然气制取氢气

天然气制取氢气工艺中，需要先对天然气进行与处理，去除其中存在的含硫化合物，然后依次使用催化剂和氧化锌将有机硫转变为无机硫，在减少天然气中含硫化合物含量后分别对其进行两端转化操作，对所得到的混合气体使用等温变化处理方法，去除一氧化碳、二氧化碳后得到纯净度较高的、能够满足合成氨制备的氮气和氢气等材料。

3.3 重油制取氢气

应用在氢气制取中的重油分子量大且内含较多碳氢化合物，需要先利用氧化反应原理对分子量较大的部分进行削弱处理，在实现大分子量向小分子量的转变后为空气中的氧气、氮气等气体营造一个能够保证其分离的高温条件，最后再利用低温甲醇洗技术和液氮法去除所得气体内的甲烷等，完成氨的合成。

4 煤化工合成氨工艺的节能优化

4.1 应用氨合成塔

作为煤化工合成氨工艺中的关键设备之一，氨合成塔的内部结构稳定性与实际性能对合成氨工艺的开展流程规范性、生产效率和最终能耗有着重要影响作用，因此为尽可能加强对煤化工合成氨工艺的节能优化设计，可以使用凯洛格塔、托普索塔等新型氨合成塔来代替传统作业模式下的氨合成塔。

目前常用于我国煤化工合成氨工艺中的新型氨合成塔主要有 S-100、S-200、S-300 等多种型号，作为托普索塔，其内部结构呈现出明显的径向或轴向——径向流动的催化剂床层结构，这种三床层中间换热式

结构氨合成塔又分为高压外筒和内件；两个结构，并由此形成了能够保证大部分氢氮气通过的独特径向流动通道。

由于氨合成塔顶部的两个主要入口会为进入到其内部的氢氮气提供通路，内件与高压壳体之间的作用力会带着氢氮气不断向下流动，高压壳体在此作用下会发生温度下降的明显变化，若此时混合气体压力已超过 15MPa，则压缩机会以自动化作业模式对气体进行压缩处理，并将其送出当前所在位置，氢氮气体在到达氨合成塔底部后会流经热交换器，同时与已经脱离氨合成塔内部催化剂层的气体发生换热反应，待温度逐渐加热并最终达到反应温度后，氢氮气体会流经中心管的输送通道向上流动。

在此过程中会出现气体的二段化学反应，所生成相应的反应气体温度会上升至 400–450℃ 左右，此时预热器在实际运行中进行的热量回收作业会保证有大量热力能源以循环状态得到有效整合处理，与热交换器相关联的压缩机在出口位置排除的气体会依次经过水冷器和冷交换器，保证进入到氨分离器内的气体温度能够在经过冷却处理后下降至 0℃，顺利将冷凝氨分离。

交换器会及时回收经过热交换和冷却处理并顺利排出的分离氨。由于冷凝氨在分离后是以液体形态输出的，因此还需将其放入压缩机循环段内，在其中混合一定量的新鲜气体，在经过整合处理后全部运输至闪蒸槽装置中进行闪蒸，闪蒸结束后还要及时将其运输至压缩机内再次进行冷冻处理，待冷冻程度达到煤化工合成氨工艺需求后，再将其重新运回合成氨系统中。

在基于托普索技术的氨合成塔的作用加持下，气体与催化剂的接触与融合更为密切，在催化剂床层中的流动阻力也将会得到有效削弱，特有的径向流动结构会在一定程度上提高气体在其体内的流速和处理总量，由此制得更多合成氨材料。

4.2 分子筛的应用

分子筛是一种基于物理吸附效应和筛分效应的硅铝酸盐晶体材料，该晶体材料的结构较为均匀且其内部存在数个微小孔隙，在强极性和库仑场的持续作用下，分子筛对以水为主的极性分子和部分不饱和分子有着较强的吸附作用。由于煤化工合成氨工艺中使用的原料气成分较为复杂，其内部大多存在大量以水蒸气为主的极性分子，对合成氨工艺的最终完成质量产生了一定影响，因此可以适当在其中加入分子筛对原料气进行干燥处理，并同时完成对一氧化碳、二氧化碳等杂质气体的净化处理。

在合成氨工艺中引入分子筛干燥系统后，需要根据现有合成氨工艺的现有流程来对整个系统回路内的“冷”“热”位置进行优化调整，比如为进一步减少氨冷器在弛放气工作中所产生的氨冷总量，可以在分氨系统之后布设弛放气处。

除此之外，在分子筛干燥系统融入现有合成氨工艺中以后，还需对其进行多次性能测试，根据合成氨工艺来调整系统运行参数，以保证新增设的分子筛干燥系统能够尽快与其他原有系统完成融合，在保证运行状态长期稳定的基础下，削弱系统的整体运行压力，杜绝合成气压缩机高压缸和低压缸之间存在较大压力差等问题的出现。

分子筛在脱硫脱碳等净化工序中的有效应用还能充分利用催化剂的自身活性，利用自身吸附和再生过程有效去除气体杂质，既避免了因气体杂质残留而导致的后续合成氨反应能耗增加、压缩机自身功效损失量增加问题，又能在提高原料器纯度的同时实现对各类能源的合理利用，以满足煤化工的合成氨生产与节能需要。

4.3 废水循环利用的改进优化

煤化工在使用先进工艺手段进行合成氨制备的过程中，通常会选用煤粉、碎煤作为合成氨的主原料，通过一定加工技术手段将煤粉、碎煤原料处理成大量煤水蒸气，并将其投入到后续合成氨生产与制备流程中。

就目前煤化工合成氨工艺的实际运行情况来看，尽管当前技术手段已经能够在尽可能减少煤粉、碎煤残留的基础上，进一步提升其转化为煤水蒸气的有效率，但煤水蒸气内还残留着大量焦油与粉尘的混合物。

需要使用废水循环利用技术对存在于煤气中的焦油和粉尘混合物进行二次或多次沉降处理，比如可以在合成氨工艺流程中增设气浮设备，先通过沉降过滤等方法对煤气进行悬浮物和颗粒物的物理处置，然后再使用气浮设备，进一步降低焦油浓度和粉尘颗粒物含量，必要时还可通过采取一定的化学处理方法来进一步减少合成氨生产中的煤炭能源损失总量，尽可能避免因焦油和粉尘未完全分离而导致的煤化工合成氨装置与输送通道的堵塞问题，在完成节能目标的基础上保证煤化工合成氨生产的顺利进行。

4.4 能量集成技术

以夹点技术为例，该技术作为一种能量集成技术，在煤化工合成氨工艺中的有效应用主要体现在热回收网络的设计上。要想保证热物流能够通过热回收网络将其热量稳定传输给冷物流、冷物流也能通过热回收网络将其热量稳定传输给热物流，则需要确定好热回

收网络的夹点，即冷热物流间在最小允许传热温差上的状态点。在充分了解并掌握煤化工合成氨工艺中所使用原料煤气预热、反应气冷却、气体闪蒸等原理的基础上，对上述作业流程中所催生的冷热物流进行夹点计算与分析，由此计算出整个合成氨系统中的夹点位置以及最小公用工程需求，并据此对现有热回收网络进行结构调整和布局优化，以保证氨合成塔出口处的高温气体能够与合成氨工艺所使用的低温原料器完成有效换热，将回收所得的高温气体热量循环利用到下一轮低温原料器的加热过程中，以实现热量能源的循环利用。

为保证夹点技术、热集成技术在煤化工合成氨工艺节能优化中的重要作用，在完成对能量流和热回收网络的设计优化与整合利用后，还需不断融入能与能量集成技术相适配的新型材料和生产工艺。比如，使用具有更高隔热性能和耐高温性能的材料，对合成氨工艺中所使用的传热设备和反应器进行更换，从而减少对外部能源的过度依赖，以达到降低能耗的节能目的。

5 煤化工合成氨工艺在节能优化后的经济性评价

以某化工企业为例，该企业在原有富氧连续气化法生产合成氨工艺的基础上，对所使用的氧气进行了浓度调整，并利用制氧装置将氧气浓度由原有的 21% 提高至 50%，原料煤的种类也由规格 25mm~80mm 的无烟低硫中块煤变成了规格为 6mm~50mm 的无烟碎煤，所使用原料煤的价格由 1230 元 / 吨下降到 1075 元 / 吨，吨氨煤耗由 1.35 吨降低 1.15 至吨，每年可节省电力消耗约 500 万千瓦时，在能量集成技术的作用下，每年节约蒸汽成本 200 万元、节约煤炭燃料成本约 150 万元；以每年生产 10 万吨合成氨作为该企业的平均生产总量来计算，分子筛干燥系统在合成氨工艺中的有效应用进一步提高了原料气的纯净度，使得合成氨反应更充分，原料消耗率相较于传统作业模式降低了至少 3%，每年可节约原料成本 400 万元左右。另外，分子筛的加入还在一定程度上延长了各种催化剂的有效使用寿命，减少了催化剂的更换时间和相应设备的维护成本，约 50 万元。

参考文献：

- [1] 李建灿 . 煤化工合成氨工艺分析及节能优化措施研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量 ,2024,44(21):145-147.

作者简介：

苑光辉 (1987-)，女，汉族，山东五莲人，硕士研究生，工程师，研究方向：化学工程