

File No. 83

绿氨、蓝氨和灰氨

氨(NH_3)是化学工业上最为基本的含氮化合物原料,广泛用于合成包括化肥在内的许多无机或有机氮化合物。

1774年英国人约瑟夫·普里斯特利(Joseph Priestley)发现和证实了氨的存在。20世纪初德国人弗里茨·哈伯(Fritz Haber)发明了以氮气和氢气为原料人工合成氨的方法,德国巴斯夫公司的工程师卡尔·博世(Carl Bosch)将其进行改良和实现商业化生产。因此,工业上合成氨的方法被称为哈伯-博世法。

合成氨的原料是氮气(N_2)和氢气(H_2)。空气中约有78%是氮气,可以通过将空气冷却至 -196°C ,让空气中的氮气液化后进行分离而得到。然而,氢气的化学反应性很强,不能单独存在于自然界里。获取氢气的方法主要有水的电解、天然气重整和煤炭气化。根据作为合成氨原料的制氢方式和制氢过程中产生的二氧化碳处理方式,合成氨大致可分为灰氨、蓝氨和绿氨三大类(图1)。下面将分别讲解这三大类合成氨的特征。

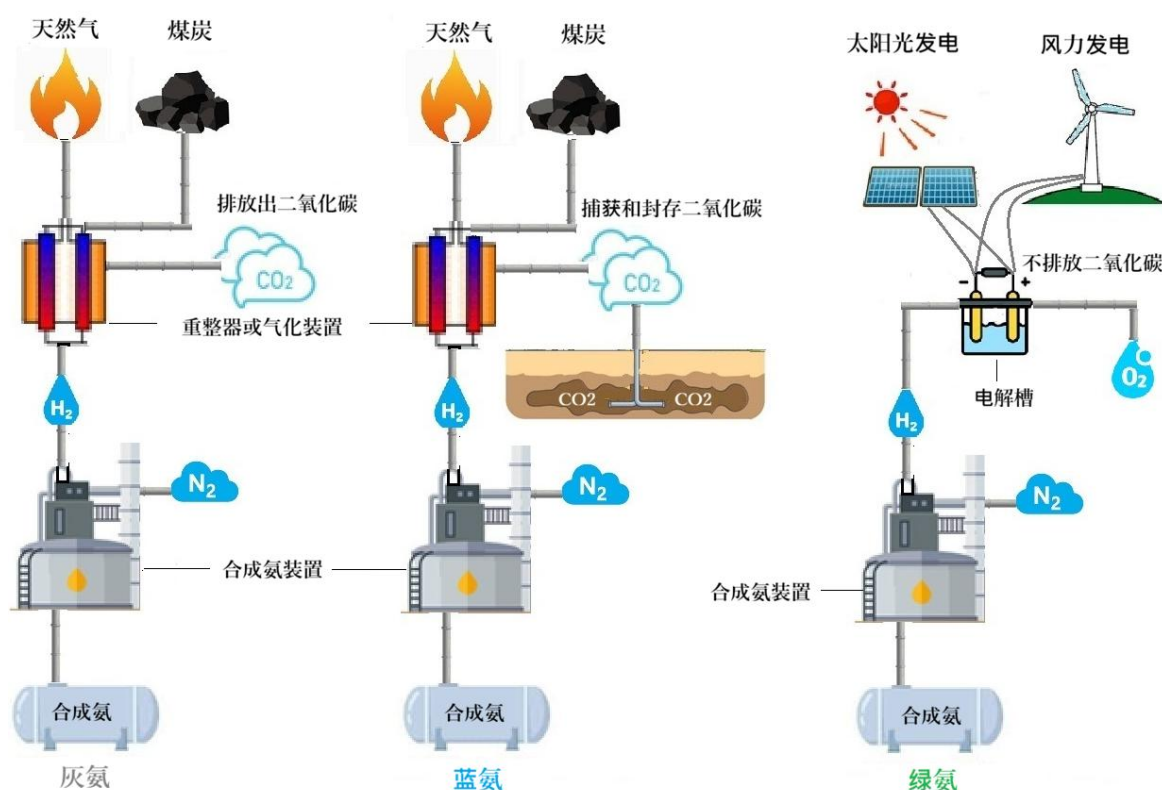


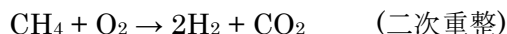
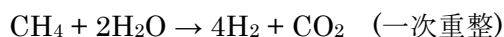
图1. 灰氨、蓝氨和绿氨的合成方式示意图

一、灰氨

灰氨是指使用天然气或煤炭等化石燃料进行重整或气化后制得的氢气为原料合成的氨。因为使用天然气或煤炭在制氢时会排放出大量二氧化碳,而二氧化碳属于温室气体,它能吸收

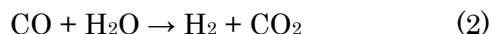
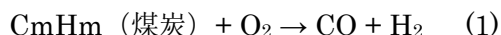
并重新辐射地球热量，形成“温室效应”。在制氢过程中若没有捕获和封存排放出来的二氧化碳，让其自由排放到大气中，就会加剧全球变暖，给环境造成不良影响，因此被称为灰氨。

利用天然气来制取氢气均使用蒸汽重整法。天然气的主要成分是甲烷（CH₄）。甲烷在催化剂的作用下可与水蒸气发生反应生成氢气和二氧化碳。其反应式如下：



理论上，制取 1 公斤氢气需要消耗 2 公斤天然气和 31.5 兆焦耳的热能，并会排放出约 5.5 公斤二氧化碳。在重整过程中亦需要消费热能和动力，实际上用天然气作原料每制取 1 公斤氢气则会排放出约 11.4 公斤二氧化碳。

若是以煤炭为原料制取氢气则需要使用气化法。首先，将煤炭燃烧生成一氧化碳和氢气，气化后生成的一氧化碳再与水蒸气反应生成氢气，在该过程中排放出二氧化碳。其反应式如下：



根据煤炭的种类和热值，理论上，制取 1 公斤氢气需要消耗 3.5~5 公斤煤炭和 31.5 兆焦耳的热能，同时排放出 8~10 公斤二氧化碳。因为在煤炭的气化反应中需要先燃烧生成一氧化碳，必须消耗更多的热能，所以用煤炭作原料每制取 1 公斤氢气会排放出 23~26 公斤二氧化碳。

因为 1 公斤氢气可以合成 5.66 公斤氨，在合成氨的过程中还需要消耗热能和动力。因此，当使用天然气作为原料时，每合成 1 公斤氨大约会排放出 1.9~2.1 公斤二氧化碳。而使用煤炭作为原料时，二氧化碳的排放量会更多，每合成 1 公斤氨会排放出 4~5 公斤二氧化碳。

由于天然气和煤炭等化石燃料的价格低廉，使用天然气或煤炭为原料来合成氨是最经济的方法。国际市场上的灰氨价格直接与天然气价格挂钩，2026 年 1 月的灰氨离岸价格约为每吨 320~350 美元，折合成日元约为每公斤 51~56 日元。根据日本财务省的海关统计数据，2025 年 1 月至 11 月的合成氨平均进口价格为每吨 57,647 日元。

二、蓝氨

使用天然气或煤炭等化石燃料进行重整或气化获得的氢气时，对制氢过程中排放出来的二氧化碳进行捕获和封存，可以减少排放到大气中的二氧化碳量。用这种方式制取的氢气为原料合成的氨因为削弱了二氧化碳的“温室效应”，所以被称为蓝氨。

从制氢过程中回收的二氧化碳主要是通过加压液化后注入到地下 800 米或更深的可以防止二氧化碳泄漏的多孔地质结构（例如砂岩等含水层或枯竭了的油气田）中进行封存。二氧化碳在 7.38 兆帕的压力和 31.1 摄氏度或更高的温度下会呈现出超临界状态，体积减少到气态时的约 1/300，并具有低粘度和高扩散性。二氧化碳在这种状态下被封存在地下的多孔地质结构中的技术被称为 CCS 技术（Carbon Capture and Storage、碳捕获与封存）。

在制氢过程中回收的二氧化碳还可以作为原料用于制造其他化学产品或用于工业用途。这项技术被称为 CCU 技术（Carbon Capture and Utilization、碳捕获和利用）。

利用化石燃料制取氢气和合成氨的过程中会排放出大量的二氧化碳，而目前的捕获回收技术只能达到约 70% 的二氧化碳捕获率。因此，即使是使用天然气为原料合成的蓝氨，每合成 1 公斤氨仍会排放出 0.6~1.0 公斤二氧化碳。

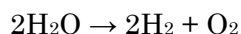
将捕获的二氧化碳进行液化后运输和注入地下，封存在多孔地质结构中亦需要消耗大量的动力，当然也会产生和排放出一定数量的二氧化碳。

因为蓝氨需要对排放出的二氧化碳进行捕获和封存，增加了其生产成本。因此蓝氨的价格大约是灰氨的 1.5~2 倍。蓝氨在国际市场上的实际交易量很少，2026 年 1 月份的蓝氨离岸参考价格约为每吨 500~800 美元（每吨 8 万~12.5 万日元）。

三、绿氨

绿氨是指利用可再生能源（例如太阳能和风能）所产生的电力来进行水的电解制氢，用这些氢气为原料合成的氨被称为绿氨。

水（ H_2O ）是由 1 个氧原子和 2 个氢原子组成的物质，可以用电解方法将其分解成氧气和氢气。其反应式如下：



在水的电解过程中，阴极（负极）发生还原反应而生成氢气，阳极（正极）发生氧化反应而生成氧气，不会产生二氧化碳。因此，利用水的电解制氢为原料合成的氨因对环境的影响较小被称为绿氨。

纯水是绝缘体，导电性很差，因此在纯水中很难进行电解。需要在水中添加少量的氢氧化钠等电解质来增加导电性，促进水的电解。

理论上，1 摩尔（18 克）的水完全分解成氧气和氢气需要 286 千焦耳的能量。换算成电能单位（瓦特），则约为 79.4 瓦。换句话说，理论上，利用水的电解制取 1 公斤氢气需要消耗 35.75 千瓦时（度）的电能。实际操作中由于需要升高电压和克服电解液的电阻，还会产生一定的能耗。电解效率亦会因电解过程中水温升高、水中存在的杂质以及溶解物质的种类而发生变动。通常，碱性电解槽和 PEM 电解槽的效率约为 60~75%。目前使用水的电解制氢约为每制氢 1 公斤需要消耗 45~60 千瓦时（度）。

实际上，利用太阳能和风能等可再生能源发电，通过水的电解来生产绿氨仍面临诸多挑战。首先是成本问题。可再生能源的太阳能电池板或风力发电设施价格昂贵，安装地区受限。其次是太阳能和风能发电的输出电力和电压不稳定，能够妥善对应这类非稳定电压和功率的电解槽种类少，造价高，运行困难。

就成本而言，绿氨的价格可能是灰氨的 2~3 倍或更高。按照日本国内大型工业用电价格 16 日元/千瓦时来计算，水的电解制氢每生产 1 公斤氢的电费就需 720~960 日元。由此推算，每吨绿氨的生产成本将超过 16 万日元。目前国际市场上尚无绿氨的实际交易，据了解，预测每吨绿氨的离岸价会超过了 700 美元（11 万日元）。但是，随着太阳能和风能等可再生能源电力价格的下降，部分国家或地区的绿氨生产成本有可能降到与蓝氨相等或更低。

表 1 归纳了上述灰氨，蓝氨和绿氨的主要特征。

表 1. 灰氨，蓝氨和绿氨的主要特征

项目	灰氨	蓝氨	绿氨
原料	化石燃料 (天然气、煤炭)	化石燃料 (天然气、煤炭)	可再生能源 (太阳能和风能发电)
制造方法	使用天然气的重整或煤炭的气化制氢，用该氢气为原料生产合成氨	使用天然气的重整或煤炭的气化制氢，用该氢气为原料生产合成氨	使用水的电解制氢，用该氢气为原料生产合成氨
CO ₂ 排放量 (用天然气制氢时)	合成 1 公斤氨会排放出 1.9~2.1 公斤 CO ₂	因为制氢过程中大部分 CO ₂ 得到捕获和封存，合成 1 公斤氨时的 CO ₂ 排放量减少到 0.6~1.0 公斤	基本不会排放 CO ₂
生产成本	便宜	约为灰氨的 1.5 倍	最为高价。现在约为灰氨的 2~3 倍或更多
技术成熟度	已经完全确立的成熟技术	比较成熟的技术。但封存地层的稳定性评价和防止 CO ₂ 漏泄的技术尚有较多课题	仍处于开发·验证阶段，技术尚未成熟
环境影响度	主要是大量排放的 CO ₂ 作为温室气体产生的温室效应对环境造成不良影响	可减少 CO ₂ 排放量，但 CO ₂ 封存场所对环境的破坏以及 CO ₂ 封存后对环境的影响不明	基本不会排放 CO ₂ ，但设置的太阳能电池板或风车对环境有一定的影响，废弃时亦有影响
主要用途	化肥，化学原料等	除了作为化肥和化学原料等之外，还可用于火力发电	用于化学原料和火力发电和船舶车辆的燃料来达成去碳化的目标

此外，利用原子能发电的电进行水的电解制氢所合成的氨被称为“粉氨”，同样基本不会排放出二氧化碳。美国和法国有计划开发用原子能发电的电力来生产粉氨。