

告别哈伯-博施法：合成氨的绿色新路径

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42646.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

告别哈伯-博施法：合成氨的绿色新路径。

全世界每年合成氨的需求量在2.0亿吨左右。传统的哈伯-博施法（Haber-Bosch Process）合成氨工艺虽实现了大规模工业化，但其高温高压条件致使能耗巨大、碳排放严重，每年导致3亿吨碳排放，消耗的能源高达全世界能源总消耗的2%左右，难以满足双碳背景下的可持续发展需求，迫切需要研发低能耗的合成氨新方法。

石河子大学于锋教授发表观点文章，讨论了一步法合成氨和两步法合成氨的发展现状和新趋势，指出了绿电驱动电催化、等离子体催化等合成氨的卡脖子问题与解决策略。阐述了近年来在热催化、电催化、光催化及等离子体催化等温和条件下合成氨的研究进展，着重介绍了以氮氧化物（NO_x）为氮源的新型合成路径，尤其是N₂先氧化后还原两步法的创新策略，彰显出良好的原子经济性与绿色低碳潜力。文章还对比了不同催化方式的反应条件、产率及选择性，剖析了当前面临的关键挑战，为绿色、分布式、可持续的合成氨技术路线提供了理论依据与发展思路。

未来研究路径需聚焦3个方面：一是优化一步法催化体系，通过机器学习辅助催化剂设计、缺陷工程与异质结构建等策略，提升热/电/光/等离子体催化的活性、稳定性及能量利用效率；二是推进两步法技术，优化等离子体氧化效率以提高NO选择性、降低分离成本，强化多技术耦合与反应器规模化，拓展工业废气管网NO_x作为低成本氮源；三是建立统一的实验规范与检测体系，强制¹⁵N₂同位素验证、多方法交叉校准及污染物溯源，解决数据假阳性问题。

一步法合成氨：各有突破但仍需产业化检验

热催化仍是目前唯一实现工业化的合成氨技术，其核心优势在于反应速率快、产氨效率高。新型双活性中心催化剂可在温和条件下（< 300 °C）实现氮气还原合成氨。虽然NO氨气化合合成氨也得到了关注，但依然存在温度窗口窄、抗氧中毒性差等问题。新型低温催化剂的材料稳定性与工程可行性仍有待提升，机器学习辅助设计有望推动高稳定性催化剂的开发与应用。电催化合成氨因具有使用清洁能源、环境友好等优势，是一种极具吸引力的方法，被认为是最有可能实现产业应用的技术之一。光催化合成氨可避免高温高压条件，实现太阳能直接合成氨，其可持续性和环境友好特性为未来能源系统和化肥工业的低碳转型提供了创新解决方案。但是当前大多数光催化剂的太阳能转化效率仍低于0.1%的实用化门槛，距离工业化应用尚有差距。低温等离子体技术也被应用于合成氨反应，等离子体能够有效激活N₂，从而提高合成氨的速率，但等离子体催化合成氨的选择性及能量效率依然面临巨大挑战。

两步法新策略：突破 N₂加氢还原的核心瓶颈

近年来，先氧化再还原两步法合成氨逐渐受到重视。通过非热等离子体技术，将氮气活化为氮氧化物，然后采用电催化、光催化等方法使其还原为氨气，实现了从大气氮气到高浓度NH₃的高效转化，为两步法合成氨提供了兼具科学突破性和经济可行性的新范式。需要注意的是，尽管"等离子体氧化+电/光还原"两步法在理论上可利用温和条件规避N₂直接还原的惰性瓶颈，但其实际应用面临能耗高与分离成本高的挑战：一是N₂氧化步骤能效极低，等离子体法能量转化率仅0.25%~7%；二是NO/NO₃⁻分离纯化成本高昂，等离子体产物为NO、NO₂、N₂、O₃等复杂混合物，NO选择性<50%。

揪出隐形痛点：规范氨的定量检测

新兴合成氨技术的产率普遍处于微摩尔级，氨的准确定量检测已成为制约领域发展的关键瓶颈。由于产物浓度极低，检测方法极易受到交叉污染与化学干扰的影响，导致大量研究数据存在假阳性风险。建立严格的检测规范与污染物控制标准，是提升该领域科学可信度的当务之急。目前常用的方法是靛酚蓝法，具有操作简便且检测限低（~0.01 ppm）的优点，但其对pH、温度和试剂浓度的高度敏感性使其易受多重干扰。离子色谱法具备出色的准确性和重复性（检测限低至3×10⁻⁶M），且不受有机牺牲剂干扰，但其在含Li⁺、Na⁺电解质中会因NH₄⁺与碱金属峰重叠而失效，高昂的设备成本和繁琐的样品前处理也限制了其作为常规筛选工具的应用。¹ N₂同位素标记实验作为可靠的氨来源验证手段，当前实施存在一些不足，例如，市售¹ N₂气体本身含0.1%~0.5%的¹ NH₃、¹ NO_x杂质，直接使用会导致假阳性，必须通过酸性KMnO₄洗涤纯化并定量分析气体。此外，含氮催化剂降解、Nafion膜水解等污染源进一步加剧假产率风险，国际学界亟需建立统一的测试标准。

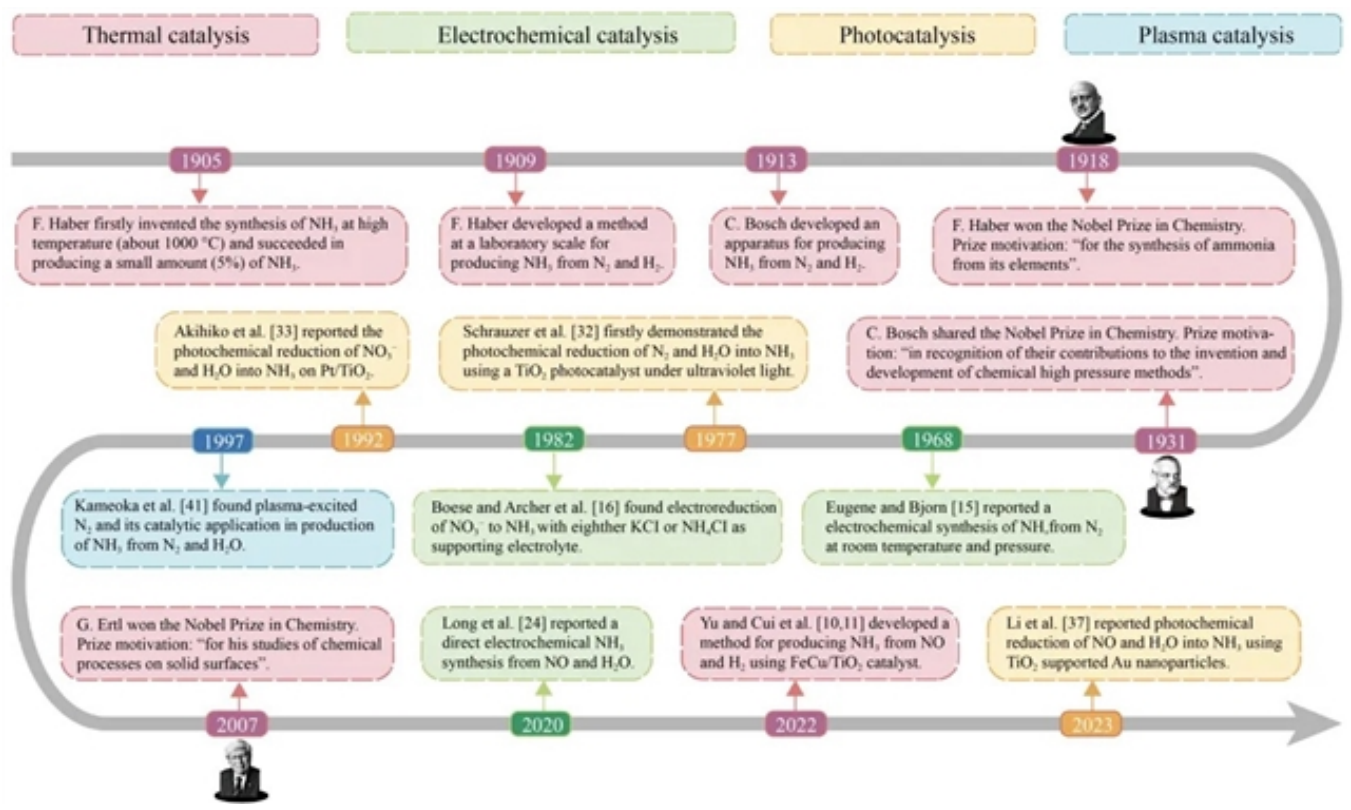


图1.合成氨技术百年时间轴：展现技术从高能耗到绿色可持续的演变，自1905年Fritz Haber首次在高温合成NH₃开始，反应条件历经电催化、光催化和等离子体催化等，氮源包括了N₂、NO和NO₃⁻等。

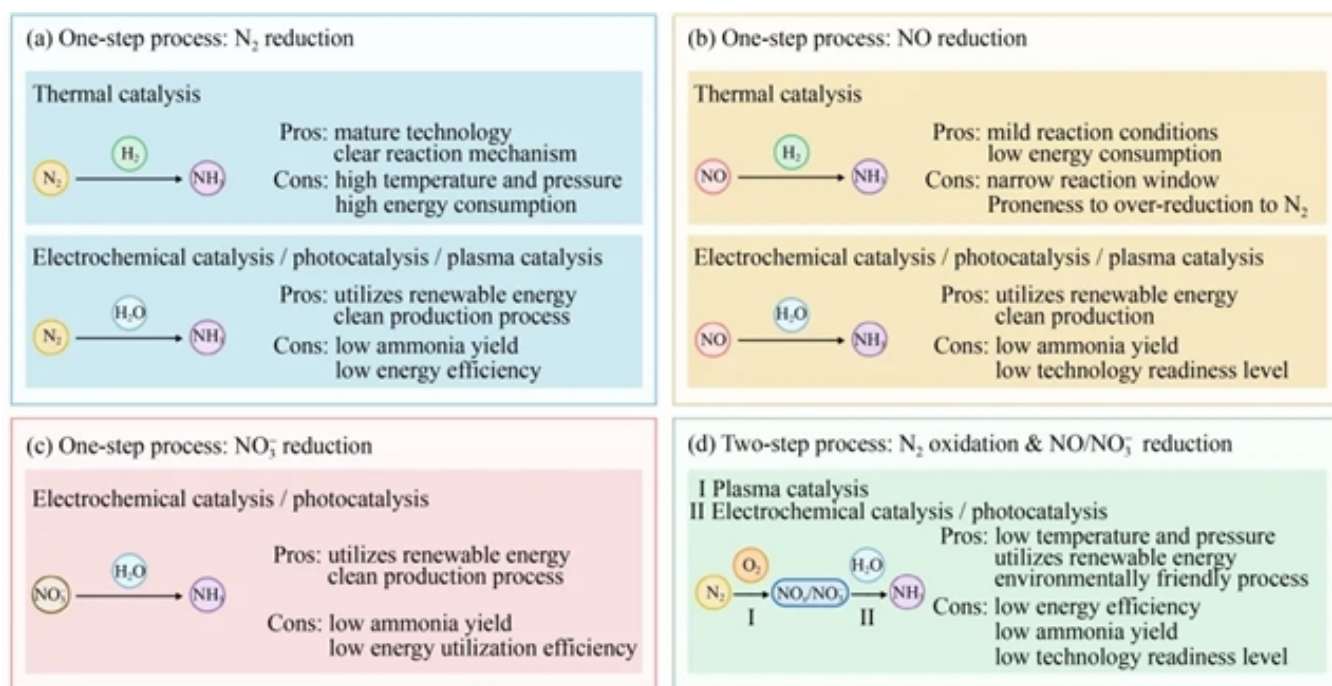


图2.一步法和两步法合成氨的路径：一步法主要以 N_2 、NO和 NO_3^- 直接还原合成氨，二步法主要是指 N_2 先氧化再还原合成氨。

（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/fcse/EN/10.1007/s11705-026-2625-y>

作者：于锋 等 来源：《工程·化学工程》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发