

中国高温气冷堆制氢发展战略研究

张平, 徐景明, 石磊, 张作义

(清华大学核能与新能源技术研究院先进核能技术协同创新中心, 北京 100084)

摘要: 核能制氢是一种有应用前景的高效、大规模、无排放的制氢技术, 有望在氢气大规模集中供应的场景中起到重要作用。高温气冷堆是最适于核能制氢的堆型, 在我国已有几十年的研发基础, 目前正在国家科技重大专项支持下建造高温气冷堆示范电站。本文介绍了核能制氢技术的特点和主流的核能制氢工艺包括热化学碘硫循环、混合硫循环和高温蒸汽电解的原理, 对国际上核能制氢技术发展现状进行了简要综述, 并概述了清华大学在该领域的研发现状。此外对核能制氢的安全性、技术经济评价等问题进行了讨论, 在此基础上对与高温气冷堆耦合的制氢技术进行了评价, 并以氢气直接还原炼铁为例探讨了高温气冷堆制氢在工业领域的应用前景。最后对我国高温气冷堆制氢技术的发展路线进行了探讨。

关键词: 高温气冷堆; 核能制氢; 热化学循环; 高温电解; 技术路线

中图分类号: TL424 **文献标识码:** A

Nuclear Hydrogen Production Based on High Temperature Gas Cooled Reactor in China

Zhang Ping, Xu Jingming, Shi Lei, Zhang Zuoyi

(Collaborative Innovation Center of Advanced Nuclear Energy Technology Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Nuclear hydrogen production is one of the most prospective approaches for efficient, massive and CO₂-free hydrogen production, while the high temperature gas cooled reactor (HTGR) which has been intensively developed in China is considered as the most suitable reactor type for nuclear hydrogen production. Currently, the HTGR demonstration plant, HTR-PM, is under construction under the framework of the National Science and Technology Major Project. The principles and main routes for nuclear hydrogen production, including the iodine-sulfur thermochemical water-splitting process, the hybrid sulfur process, as well as the high temperature steam electrolysis, are introduced. The progress of the nuclear hydrogen production technologies both in the world and China are shortly presented and reviewed, and its safety analysis and techno-economic assessment are discussed. In addition, the potential technologies for coupling to the reactor are discussed, and the industrial application of the nuclear hydrogen production based on HTGR is prospected, taking steelmaking by hydrogen as an example. Finally, the development strategy and prospects of nuclear hydrogen production technology in China are proposed.

Keywords: high temperature gas cooled reactor; nuclear hydrogen production; thermochemical cycle; high temperature steam electrolysis; technology route

收稿日期: 2019-01-10; 修回日期: 2019-01-18

通讯作者: 张平, 清华大学核能与新能源技术研究院先进核能技术协同创新中心, 研究员, 主要研究方向为核能制氢;

E-mail: zhangping77@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新一代核能用材发展战略研究”(2016-ZD-06)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

氢是重要的工业原料，也是未来理想的二次能源或能源载体；氢作为二次能源便于储存和运输，且可以直接作为燃料使用。除传统的合成氨、合成甲醇、石油精炼外，氢气在氢冶金、煤液化以及燃料电池汽车等领域都能够得到大规模利用。利用核能制氢，可以实现氢气的高效、大规模、无碳排放制备。

在国家“863 计划”支持下，我国 10 MW_t 高温气冷试验堆已在清华大学核能与新能源技术研究院建成并实现满功率运行。在国家科技重大专项支持下，200 MW_e 高温气冷堆核电站示范工程的建设正在进行 [1]；核能制氢和氢气透平等前瞻性技术的研发已开展。在可用于核能制氢的反应堆堆型中，高温气冷堆因其高出口温度和固有安全性等优势，被认为是最适合用于制氢的堆型 [2]。核能制氢是高温气冷堆发电外最重要的用途，将为未来高温堆的应用拓展新的领域。核能制氢技术研发既有利于保持我国高温气冷堆技术的国际领先优势，也为未来氢气的大规模供应提供了一种有效的解决方案，同时可为高温堆工艺热应用开辟新的用途，对我国未来的能源战略转变具有重大意义。

二、核能制氢技术简述

核能制氢就是利用核反应堆产生的热作为一次

能源，从含氢元素的物质水或化石燃料制备氢气。

（一）制氢用反应堆

目前广泛用于发电的压水堆等堆型利用高温蒸汽作为热载体，由于出口温度相对较低，主要用于发电。第四代核能系统论坛（GIF）筛选了 6 种堆型（包括钠冷快堆、气冷快堆、铅冷快堆、熔盐堆、超临界水堆、超 / 高温气冷堆）作为未来发展的方向，除在经济性、安全性、可持续性等方面的目标外，希望能有效拓展核能在非发电领域的应用。在这 6 种堆型中，超 / 高温气冷堆由于具有固有安全性、高出口温度、功率适宜等特点，被认为是非常适合用于制氢的堆型 [3]。在 GIF 中专门设置了高温堆制氢项目管理部，协调国际上核能制氢相关的国家交流与合作。

（二）核能制氢技术

作为一种二次能源或能源载体，氢气需要利用一次能源从含氢物质来制取。图 1 为利用核能制取氢气的技术路线。

在图 1 所示的技术路线中，核热辅助的烃类重整利用高温气冷堆的工艺热代替常规技术中的热源，可部分减少化石燃料的使用，也相应减少部分 CO₂ 排放。利用核能发电再经常规电解制氢，是已成熟技术的结合，但从一次能源转化为氢能的效率较低。在一些压水堆发电能力过剩、需要消纳或者特殊应用的场景中，可利用电解制氢实现储能或者

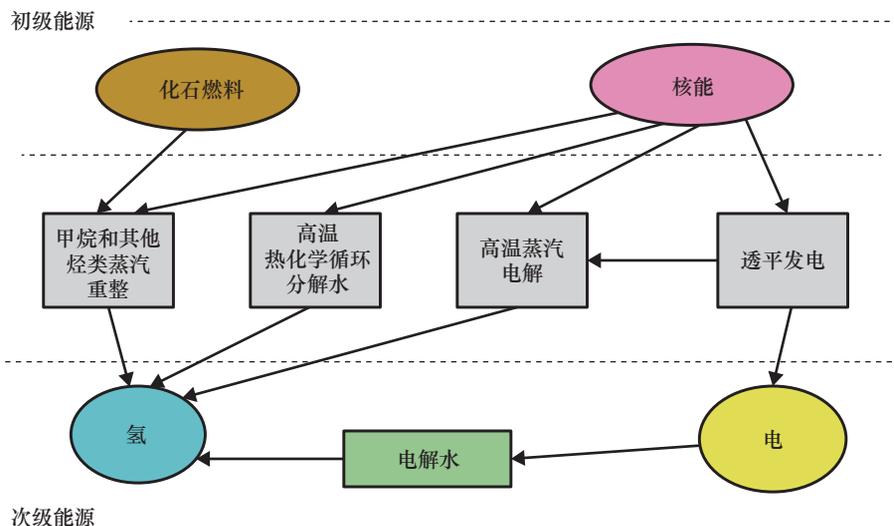


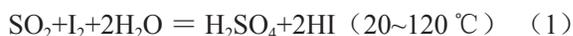
图 1 核能制氢技术路线

供给需要氢气的场合。要实现核能到氢能的高效转化，必须部分或全部利用以反应堆提供的工艺热，减少热-电转换过程中的效率损失。目前研发的主流核能制氢技术包括热化学循环（碘硫循环和混合硫循环）和高温蒸汽电解。

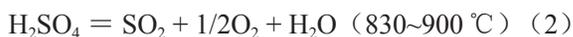
1. 碘硫循环

碘硫循环 (IS cycle) 由美国通用原子公司 (GA) 最早提出 [4]，被认为是最有应用前景的核能制氢技术。碘硫循环由如式 (1) ~ 式 (3) 所示的三步反应相耦合，组成一个闭合过程，净结果为水分解产生氢气和氧气。这样可将原本需要在 2500 °C 以上高温下才能进行的水分解反应在 800~900 °C 下得以实现：

Bunsen 反应（产生硫酸和氢碘酸）：



硫酸分解反应（产生氧）：



氢碘酸分解反应（产生氢）：



以高温气冷堆为热源经碘硫循环制氢过程原理如图 2 所示。

碘硫循环以硫酸分解作为高温吸热过程，可与高温气冷反应堆热出口温度良好匹配，预期制氢效率可达 50% 以上；整个过程可在全流态下运行，易于实现放大和连续操作，适于大规模制氢；在整个制氢过程中基本可以消除温室气体排放。

2. 混合硫循环

混合硫循环 (HyS cycle) 最初由美国西屋电气公司提出 [5]，是筛选出的另一种有工业应用前景的核能制氢流程，其原理如图 3 所示。

HyS 循环包括如下两步反应：

SO₂ 去极化电解：



硫酸分解反应：



SO₂ 电解产生硫酸和氢气，硫酸分解产生 SO₂ 再用于电解反应，如此组成闭合循环；净结果为水分解产生氢气和氧气。循环只有两步过程组成，同

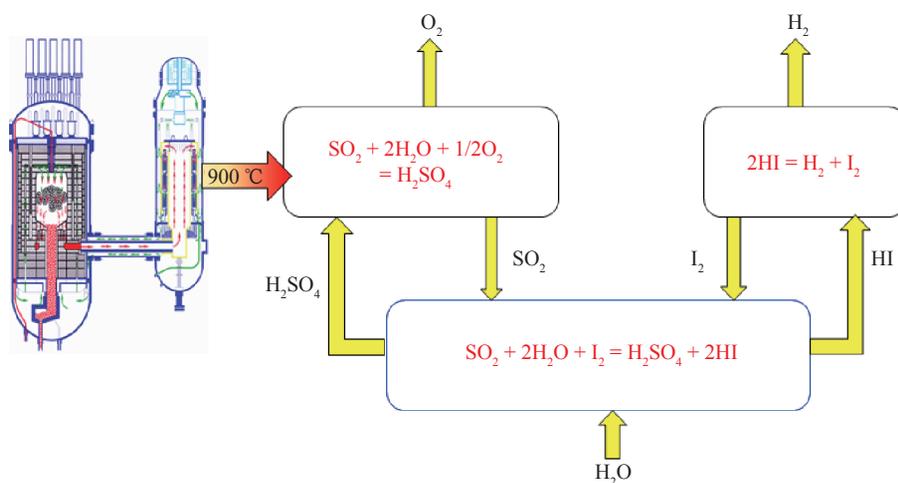


图 2 高温气冷堆碘硫循环制氢原理示意图

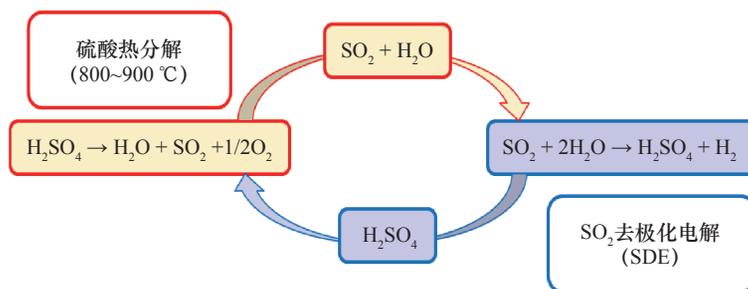


图 3 混合硫循环原理示意图

时利用高温热和电，其效率远高于常规电解，又可部分避免纯高温热过程带来的材料和工程问题。

3. 高温蒸汽电解

高温蒸汽电解利用如图 4 所示的固体氧化物燃料电池（SOEC）实现高温水蒸气的电解。与常规电解相比，所需能量一部分以热的形式供给，因此过程效率可以显著提高 [6]。

SOEC 电解水制氢是目前发展的固体氧化物燃料电池（SOFC）的逆运行。基本过程如图 4 所示：水蒸气进入 SOEC 氢电极，与外电路提供的电子结合，发生还原反应生成氢气，同时产生氧离子，氧离子在外加电场作用下，经电解质层中的氧空穴传递至氧电极，随后发生氧化反应生成氧气，失去的电子回到外电路，形成闭合回路。

三、核能制氢研发现状

（一）国际研发现状

1. 日本研发现状 [7]

20 世纪 80 年代至今日本原子力机构（JAEA）一直在进行高温气冷堆和碘硫循环制氢的研究。其开发的 30 MW 高温气冷试验堆（HTTR）反应堆出口温度在 2004 年提高到 950 °C。JAEA 设计了氢电联产的商业反应堆 GTHTR300C，重点应用领域为核能制氢和氦气透平。JAEA 先后建成了碘硫循环原理验证台架（1 NL/h）、实验室规模台架（50 NL/h），实现了过程连续运行。近年来建立了工程材料台架（200 NL/h），正在进行材料考验、设备完整性、长时间运行、膜分离等研发工作，目的在于考察和验证设备的可制造性和在苛刻环境中的性能，并研究提高过程效率的强化技术。此外还进行了过程的动态模拟、核氢安全等多方面研究。

后续计划利用 HTTR 对核氢技术进行示范，同时 JAEA 还在进行多功能商用高温堆示范设计，用于制氢、发电和海水淡化；并且对核氢炼钢的应用可行性进行了设计和研究。

2. 美国研发现状 [8,9]

进入 21 世纪美国重新重视并开展核能制氢研究，在出台的一系列氢能发展计划如国家氢能技术路线图、氢燃料计划、核氢启动计划以及下一代核电站计划中都包含核能制氢相关内容。研发集中在由先进核系统驱动的高温水分解技术及相关基础科学研究，包括碘硫循环、混合硫循环和高温电解。碘硫循环的研究由 GA、桑迪亚国家实验室和法国原子能委员会合作进行，在 2009 年建成了工程材料制造的小型台架并进行了实验。混合硫循环由萨凡纳河国家实验室和一些大学联合开发，研发成功了二氧化硫去极化电解装置。高温蒸汽电解主要在爱达荷国家实验室进行，开发了 10 kW 级电解堆并在高温电解设施上进行了考验。

3. 韩国研发现状 [10]

韩国正在进行核氢研发和示范项目，最终目标是在 2030 年以后实现核氢技术商业化。从 2004 年起韩国开始执行核氢开发与示范（NHDD）计划，确定了利用高温气冷堆进行经济、高效制氢的技术路线，完成了商用核能制氢厂的前期概念设计。核氢工艺主要选择碘硫循环。相关研究由韩国原子能研究院负责，目前正在研发采用工程材料的反应器，建立了产氢率 50 NL/h 的回路，正在进行闭合循环实验。韩国多个研发机构和企业共同成立了核能制氢产业联盟，对核能制氢在钢铁行业的富氢还原、纯氢还原等领域进行了可行性研究。

4. 加拿大研发现状 [11]

加拿大天然资源委员会制定的第四代国家计划

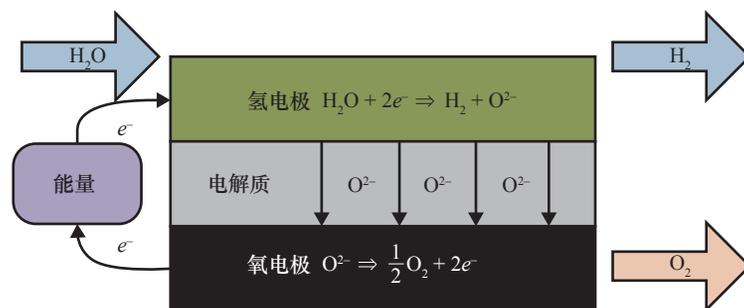


图 4 固体氧化物电解制氢原理示意图

中要发展 SCWR，其用途之一是实现制氢。制氢工艺主要选择可与超临界水堆最高出口温度相匹配的中温热化学铜氯循环，也正在研究对碘硫循环进行改进以适应 SCWR 的较低出口温度。目前研发重点为铜氯循环，由安大略理工大学负责，加拿大国家核实验室（CNL）、美国阿贡国家实验室等机构参与。此外，CNL 也在开展高温蒸汽电解的模型建立及电解的初步工作。四步骤铜氯循环反应组成见表 1。

5. 国际组织研发现状 [12]

核能制氢的国际合作也比较活跃。第四代核能系统论坛中的高温气冷堆系统设置了制氢项目管理部，定期召开会议讨论研发进展和问题，目前清华大学作为中国代表全面参与高温气冷堆系统及各项部部的活动。国际原子能机构（IAEA）设置了核能制氢经济性相关的协调项目，有十多个国家共同参与进行核能制氢技术经济的评价；清华大学核能与新能源技术研究院也成功申请该课题资助并全面参与相关研究。

（二）我国高温气冷堆制氢研发进展

1. 碘硫循环研发进展 [13,14]

我国核能制氢起步于“十一五”初期，对核能制氢的主流工艺——热化学循环分解水制氢和高温蒸汽电解制氢进行了基础研究，建成了原理验证设施并进行了初步运行试验，验证了工艺的可行性。

“十二五”期间，国家科技重大专项“先进压水堆与高温气冷堆核电站”中设置了前瞻性研究课题——高温堆制氢工艺关键技术并在“高温气冷堆重大专项总体实施方案”中提出开展氦气透平直接循环发电及高温堆制氢等技术研究，为发展第四代核电技术奠定基础。主要目标是掌握碘硫循环和高温蒸汽电解的工艺关键技术，建成集成实验室规模的碘硫循环台架，实现闭合连续运行；同时建成高

温电解设施并进行电解实验。

清华大学核能与新能源技术研究院对碘硫循环的化学反应和分离过程进行了系统研究，包括多相反应动力学、相平衡、催化剂、电解渗析、反应精馏等多领域；同时解决了循环闭合运行涉及过程模拟与优化，强腐蚀性、高密度浆料输送，在线测量与控制等多方面工程难题，在工艺关键技术方面取得了多项成果，包括：①建立了碘硫循环涉及的主要物种的四元体系的四面体相图，提出相态判据，建立了组成预测模型，并开发为相态判断的软件，可为循环闭合操作时的相态及组成预测提供指导；②开发了可在高温、强腐蚀环境下使用的高性能硫酸和氢碘酸分解催化剂，可实现两种酸的高效分解，且催化剂在 100 h 寿命试验中性能无明显衰减；③开发了用于氢碘酸浓缩的电解渗析堆及物性预测、传质、操作电压计算的模型与软件，可成功用于解决氢碘酸浓缩的难题；④建立了碘硫循环全流程模拟模型并开发为过程稳态模拟软件，并经过实验验证了可靠性，该软件可用于进行碘硫循环流程设计优化与效率评估；⑤建成了产氢能力为 100 NL/h 的集成实验室规模台架，提出了关于系统开停车、稳态运行、典型故障排除等多方面的运行策略，并成功实现了计划的产氢率 60 NL/h、60 h 连续稳定运行，证实了碘硫循环制氢技术的工艺可靠性。

2. 混合硫循环研发进展 [15]

混合硫循环制氢是另一种有工业应用前景的核能制氢工艺，其硫酸分解步骤与碘硫循环完全相同，再通过 SO₂ 去极化电解（SDE）过程得到硫酸和氢气，形成闭合循环。对 SDE 进行了系统基础研究，研究了膜电极组件制备条件和电解过程工艺参数对电解性能的影响，得到了膜电极组件的最优制备方法。为确定电解过程阳极极化电势及其组成，建立了适应液态进料的 SO₂ 去极化电解过程的原位电化学阻抗谱方法，并通过实验和计算相结合，解析出

表 1 四步骤铜氯循环组成与条件

步骤	反应	条件
产氢	$2\text{CuCl}_{(\text{aq})} + 2\text{HCl}(\text{aq}) = 2\text{CuCl}_{2(\text{aq})} + \text{H}_2(\text{g})$	<100 °C
干燥	$\text{CuCl}_{2(\text{aq})} = \text{CuCl}_{2(\text{s})}$	<100 °C
水解	$2\text{CuCl}_{2(\text{s})} + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) = \text{Cu}_2\text{OCl}_2(\text{s}) + 2\text{HCl}(\text{g})$	400 °C
产氧	$\text{Cu}_2\text{OCl}_2(\text{s}) = 2\text{CuCl}(\text{l}) + 1/2\text{O}_2$	500 °C

了电解过程各极化阻抗组成。研究表明, 阳极极化过电势在电解电压中所占比例最高; 电解反应动力学受到不同过程的控制。在较低电解电压下, SO_2 去极化电解反应的速控步骤为电化学极化过程; 在较高电压下, 速控步骤为电化学极化过程和浓差极化过程。为降低阳极极化过电势、降低催化剂成本, 对 SO_2 去极化电解过程的新型催化剂进行了探索。利用浸渍还原法制备了活性炭负载的系列 Pt 基双金属催化剂, 并对其结构、形貌、电化学性能等进行了研究。研究了不同条件下 SO_2 去极化电解反应的电流效率。通过测定电解池阴极出口气体产物的组成和速率, 证实了电解体系中 SO_2 跨膜扩散现象的存在和副反应的发生。对不同条件下的电流效率研究表明, 采用低温、高电流密度的操作条件, 电解池的电流效率接近 100%。

笔者建立了电解过程计算半经验模型, 将该模型与 Aspen Plus 结合, 实现了对混合硫循环过程的整体模拟。利用该模型对建立的混合硫循环流程进行了物料平衡计算、灵敏度分析及制氢效率初步计算, 为该流程的设计和优化提供了重要参考和有效工具。

在此基础上, 构建了产氢率为 20 NL/h 的 SO_2 去极化电解设施, 成功进行了电解实验。

3. 高温蒸汽电解研发进展 [16]

水蒸气高温电解具有过程简单、高效的优点。SOEC 电堆是高温电解制氢技术的核心装置, 由陶瓷电解池片、金属密封框、双极板、集流网、底板、顶板等多个组件构成; 各个组件的材料组成、化学、物理及机械性能各异; 且工作环境为高温 (830 °C)、高湿 (水蒸气含量 >70%) 的苛刻条件。在对高温水蒸气电解特性深入研究的基础上, 采用了创新性电堆结构设计、结合关键材料筛选、运行工艺摸索, 解决了电堆组件热膨胀系数匹配、电堆密封、电堆电性能改进、电堆机械定位等多项技术难题, 成功设计和制备出性能优良的电解电堆。还完成了实验室规模的高温水蒸气电解制氢实验系统的设计、建造和运行调试。解决了水蒸气稳定供应和精准控制等难题, 建立了可实现高温电解长期稳定运行的运行程序。在该测试平台上成功实现了 10 片电堆 (电池片面积为 10 cm × 10 cm) 的高效连续稳定运行, 系统运行时间为 115 h, 稳定产氢为 60 h, 产氢速率为 105 L/h。研发的电堆可

以满足高温蒸汽电解高温、高湿环境的苛刻要求, 电池堆结构设计具有创新性和技术可靠性, 测试系统运行正常、过程控制稳定。

四、核能制氢的安全性

未来核氢系统安全管理的目标是确保公众健康与安全并保护环境。涉及核反应堆和制氢设施耦合的安全问题有三类: ①制氢厂发生的事故和造成的释放, 要考虑可能的化学释放对核设施的系统、结构和部件造成的伤害, 包括爆炸形成的冲击波、火灾、化学品腐蚀等, 核设施的运行人员也可能面临这些威胁。②热交换系统中的事件和失效。核氢耦合的特点就是利用连接反应堆一回路冷却剂和制氢工艺设施的中间热交换器 (IHX), 热交换器的失效可能为放射性物质的释放提供通道, 或者使中间回路的流体进入堆芯。③核设施中发生的事件会影响制氢厂, 并有可能形成放射性释放的途径。反应堆运行时产生的氚有可能通过热交换器迁移, 形成进入制氢厂的途径, 包括进入产品氢。因此核氢设施的设计要考虑的问题包括核反应堆与制氢厂的安全布置, 核反应堆与制氢厂的耦合界面, 中间热交换器安全设计, 核反应堆与制氢厂的运行匹配, 以及氚的风险等 [17]。

在核氢厂的概念设计中, 对反应堆和制氢厂的实体采取了充分隔离措施, 以消除制氢厂可能发生的爆炸和化学泄漏对反应堆造成伤害, 同时也保证制氢厂的放射性水平足够低, 从而使制氢厂归于非核系统。在设计上使二回路压力高于一回路, 从而可有效实现核系统与制氢系统的隔离。氢的同位素——氕 (H)、氘 (D) 和氚 (T) 能够通过金属渗透, 为防止氢进入一回路及防止堆芯中的氚进入二回路, 正在对渗透的可能性进行考察, 并参考民用燃气 (如天然气) 国家标准中对放射性的许可标准确定是否需要必要处理。

五、核能制氢的经济性

核能制氢技术能否实现商业利用, 不仅取决于技术本身的发展, 而且还取决于所能实现的制氢效率和生产的氢的价格能否被市场所接受。正因为如此, 尽管核能制氢技术还处在发展的前期,

但其未来可能实现的制氢价格受到广泛的关注。美国、法国、日本等大力发展核能制氢技术的国家以及 IAEA 都开展了核氢经济性或技术经济评价的研究。

美国能源部在核氢创新计划下进行了核能制氢经济性评估,得到的氢气成本在 2.94~4.40 美元/kg。IAEA 开发了氢经济评估程序,参与国对核能制氢成本进行了情景分析,在不同场景下得到的氢气成本在 2.45~4.34 美元/kg,并对成本构成进行了分析。与压水堆发电一常规电解制氢相比,高温气冷堆经热化学循环或高温电解制氢具有明显的成本优势 [18,19]。

虽然对技术经济性进行了不少分析,但由于采用的反应堆堆型、技术流程以及模拟模型都存在较大的不确定性,因此相关工作仍在进行中。尽管如此,技术经济评价工作仍为核能制氢技术发展路线和未来商业应用提供了重要参考依据。

六、我国高温气冷堆制氢发展路线及应用前景初探

(一) 与高温气冷堆耦合的制氢技术评价

从核能制氢技术的特点和优势可见,高温气冷堆制氢适合对氢气集中式、大规模、无排放的应用场景。因此所选择的与高温气冷堆耦合的制氢技术也应该具有这些特点。

在前述核能到氢能的转化路线中,核能发电一电解是最为成熟的技术,可用于在剩余核电的消纳或特殊场景下用小型堆电解制氢。核能辅助的化石燃料重整可用核热作为替代热源,节省部分化石燃料并部分降低排放。例如,如果采用高温堆工艺热辅助的天然气重整技术制氢,可以节省约 30% 用作热源的天然气,降低 30% 的 CO₂ 排放。该技术可作为核能制氢近期的过渡技术,在反应堆与制氢厂耦合、核氢安全性研究与许可证申请、核能制氢技术经济评价等方面进行探索和推进。

从远期看来,热化学循环与高温蒸汽电解以高温气冷堆的高温工艺热为热源,以水为制氢原料,可完全消除制氢过程的碳排放,是更具发展前景的核能制氢技术。

核能制氢技术的发展路线必须考虑以下因素:技术特性(包括产氢能力、产品氢气纯度、终端用

户、废物管理)、成本(氢气价格、技术经济评价假设的适用性、研发费用等)、风险(技术发展现状与成熟度、研发风险)等。从核能制氢技术的特点来看,具有大规模清洁氢气需求工业领域如合成氨、氢冶金、石油精炼、煤液化、生物质精炼等是合适的终端用户,制氢厂规模应在 1×10^5 m³/h 量级。热化学循环与高温蒸汽电解两种技术都具有高效、无碳排放的特点,前者主要涉及化工技术,过程较为复杂,但放大较为容易,适合大规模制氢;后者主要涉及材料技术,过程简单,适合中小规模制氢。

(二) 高温气冷堆制氢应用前景初探

基于高温气冷堆在高温工艺热方面的独特优势,在其发展初期就曾考虑将制氢及其综合应用作为未来应用的重要方向;Yan 等 [20] 曾提出过在直接还原炼铁、合成氨、煤液化、石油精炼等领域的应用设想。鉴于高温气冷堆能同时大规模提供氢气、电、热等能源,而且综合利用可提高能源利用效率,因此特别适合于有类似需求的工业应用场景。

以氢气直接还原炼铁对高温气冷堆制氢综合应用进行初步分析,可采用图 5 所示的方案实现高温堆制氢与炼铁的耦合,将大幅度降低钢铁冶炼过程中温室气体和其他有害物质的减排,带来行业革命性的变化。

(三) 高温气冷堆制氢发展路线初探

高温气冷堆制氢项目的总体目标为实现核能制氢示范并在有关行业内应用,为部分行业热、电、氢、氧的大规模供应提供总体解决方案,为实现我国节能减排、产品升级换代提供重要技术基础。

根据高温气冷堆制氢技术的发展规律并参考国际上相关国家的研发规划,提出“原理验证与单元集成—工程材料与设备开发—工程验证—商业化示范”的发展路线,目前已完成原理验证与单元集成阶段研究,后续研发路线规划如下。

到 2020 年:完成高温气冷堆制氢关键设备技术研究。重点开展可用于碘硫循环技术的工程材料的研发,开发用于工程材料制作的关键分解器,建立模拟高温气冷堆供给高温工艺热的氢气加热的实验回路并进行实验验证;为实现利用高温气冷堆进行核能制氢中试奠定基础。目前相关研发工作正在

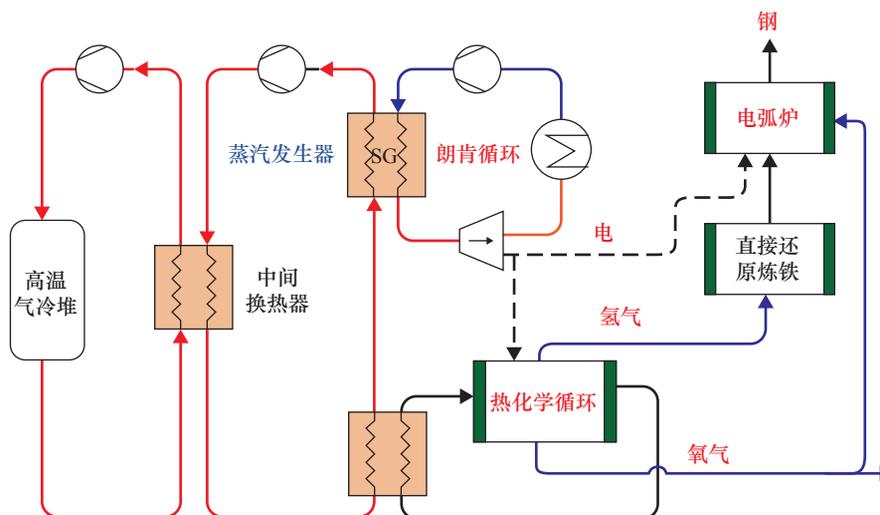


图 5 核能制氢直接还原炼铁原理路线示意图

国家科技重大专项支持下开展。

到 2025 年：高温气冷堆制氢中试工程验证。开展关键设备放大制造技术研发及制氢中试厂设计，建立产氢能力 $1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ 的高温堆制氢中试厂，利用高温氢气回路完成中试工程验证，并完成利用商业规模超高温气冷堆进行核能制氢的概念设计。

到 2030 年：开展超高温堆—核能制氢—氢冶金工程示范。

七、结语

核能制氢是一种高效、清洁的大规模制氢方法，可在未来氢气大规模供应方面扮演重要角色。以核能制氢为核心的高温堆工艺热综合利用（氢、电、热联合供应）将对我国多个工业行业的技术革命提供重要支撑，在产品升级换代、降低污染、减少碳排放等方面发挥重要作用。

在国家科技重大专项“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站”支持下，高温堆制氢关键技术研究已取得良好进展，目前正在开展关键设备样机研究；计划“十四五”期间进行中试验证，“十五五”期间进行高温堆核能制氢—氢冶金的工程示范。

参考文献

[1] Zhang Z Y, Wu Z X, Wang D Z. Current status and technical description of Chinese $2 \times 250 \text{ MW}_{\text{th}}$ HTR-PM demonstration plant [J]. Nuclear Engineering Design, 2009, 239(7): 1212–1219.

- [2] Forsberg C W. Hydrogen, nuclear energy and the advanced high-temperature reactor [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28(10): 1073–1081.
- [3] International Atomic Energy Agency. Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1999.
- [4] Funk J E. Thermochemical hydrogen production: Past and present [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2001, 26(3): 185–190.
- [5] O'Brien J A, Hinkley J T, Donne S W. Electrochemical oxidation of aqueous sulfur dioxide II. Comparative studies on platinum and gold electrodes [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2012, 159(9): F585–F593.
- [6] O'Brien J E, Herring J S, Stoots C M, et al. Progress in high-temperature electrolysis for hydrogen production using planar SOFC technology [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(4): 440–450.
- [7] Kasahara S, Iwastuki J, Takegami H, et al. Current R&D status of thermochemical water splitting iodine-sulfur process in Japan Atomic Energy Agency [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(19): 13477–13485.
- [8] Moore R, Parma E, Russ B. An integrated laboratory-scale experiment on the sulfur – Iodine thermochemical cycle for hydrogen production [R]. Washington, DC : Proceedings of HTR2008, 2008.
- [9] Vitart X, Carles P, Anzieu P. A general survey of the potential and the main issues associated with the sulfur iodine thermochemical cycle for hydrogen production using nuclear heat [J]. Progress in Nuclear Energy, 2008, 50(2–6): 402–410.
- [10] Lee B J, No H C, Yoon H J. Development of a flowsheet for iodine-sulfur thermo-chemical cycle based on optimized Bunsen reaction [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(5): 2133–2143.
- [11] Neterer G F, Suppiah S, Stolberg L, et al. Progress in thermochemical hydrogen production with the copperchlorine cycle [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(19): 6283–6295.

- [12] El-Emam RS, Khamis I. Advances in nuclear hydrogen production: Results from an IAEA international collaborative research project [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.012>.
- [13] Zhang P, Wang L J, Chen S, et al. Progress of nuclear hydrogen production through the iodine-sulfur process in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018 (18): 1802–1812.
- [14] Guo H F, Zhang P, Chen S Z, et al. Modeling and validation of the iodine-sulfur hydrogen production process [J]. *AIChE Journal*, 2014, 60(2): 546–558.
- [15] 张平, 于波, 徐景明. 我国核能制氢技术的发展 [J]. *核化学与放射化学*, 2011, 33(4):193–203.
Zhang P, Yu B, Xu J M. Development of the technology for nuclear production of hydrogen in China [J]. *Nuclear and Radiochemistry*, 2011, 33(4): 193–203.
- [16] Xue L, Zhang P, Chen S Z, et al. Quantitative analysis of the cell voltage of SO₂-depolarized electrolysis in hybrid sulfur process [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, 306: 203–207.
- [17] Sato H, Ohashi H, Nakagawa S, et al. Safety design consideration for HTGR coupling with hydrogen production plant [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2015 (82): 46–52.
- [18] Allen D, Pickard P, Patterson M. NHI economic analysis of candidate nuclear hydrogen process [C]. Oakbrook: The fourth information exchange meeting of nuclear production of hydrogen, 2009.
- [19] El-Emam RS, Ozcan H, Dincer I. Comparative cost evaluation of nuclear hydrogen production methods with the Hydrogen Economy Evaluation Program (HEEP) [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(34): 11168–11177.
- [20] Yan X, Kasahara S, Tachibana Y, et al. Study of a nuclear energy supplied steelmaking system for near-term application [J]. *Energy*, 2012 (39): 154–165.