

基于多孔介质燃烧器的氨重整制氢技术分析

王子兴¹, 杨美娥¹, 王浩鹏², 宋民航^{3,✉}

(1. 中海油石化工程有限公司, 山东 济南 250101; 2. 郑州轻工业大学 建筑环境工程学院, 河南 郑州 450002;
3. 中国科学院 过程工程研究所, 北京 100190)

摘要: [目的] 氢能具有来源广、热值高、可储存、无污染、零碳排放等优势, 已成为一种极具发展潜力的零碳清洁能源。目前, 成熟的制氢技术工艺多基于规模化制氢, 难以满足部分重要场合对紧凑型便携制氢设备的需求。[方法] 为了满足该需求, 文章首先对已有规模化制氢工艺的特点、优劣之处及发展趋势进行分析和总结, 同时考虑到氨气具有容易液化储存、氢含量高, 是氢气的优良载体等优势, 进一步提出了采用微小型绝热火焰温度多孔介质燃烧器的氨重整制氢技术思路, 并分别从技术可行性、研究方法及研究内容进行了系统分析。[结果] 具体基于已有多孔介质燃烧器研究成果, 分析了采用多孔介质燃烧器进行氨重整制氢的可行性, 在此基础上, 对多孔介质燃烧器氨重整制氢的研究方法、研究内容及技术路线进行了总结和展望。[结论] 得出针对多孔介质燃烧器的整体结构、微通道、反应载体结构等的优化设计, 并开发性能良好、成本低廉的非贵金属催化剂材料, 将是未来氨重整制氢多孔介质燃烧器的主要研究方向。本研究可以为多孔介质燃烧器氨重整制氢技术的发展提供一定理论及技术支撑。

关键词: 多孔介质燃烧器; 绝热火焰温度; 氢气; 氨气; 低 NO_x

中图分类号: TK91; TQ116.2 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)03-0055-08

开放科学(资源服务)二维码:



Technical Analysis of Ammonia Reforming Hydrogen Production Based on Porous Medium Burner

WANG Zixing¹, YANG Meie¹, WANG Haopeng², SONG Minhang^{3,✉}

(1. CNOOC Petrochemical Engineering Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China;

2. School of Building Environment Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, Henan, China;

3. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: [Introduction] Hydrogen energy is characterized by the advantages of wide sources, high calorific value, storability, no pollution, and zero carbon emissions. It has become a zero-carbon clean energy with great development potential. At present, mature hydrogen production technologies are mostly based on large-scale hydrogen production, which can hardly meet the demand for compact portable hydrogen production equipment in some important occasions. [Method] In order to meet this demand, this paper first analyzed and summarized the characteristics, advantages and disadvantages, and development trends of the existing large-scale hydrogen production technologies. Besides, considering that ammonia has the advantages of easy liquefaction and storage and high hydrogen content and is an excellent carrier for hydrogen, this paper further proposed the technical idea of using porous medium burner with adiabatic flame temperature to produce hydrogen by ammonia reformation and carried out a systematic analysis from the aspects of technical feasibility, research methods and research contents. [Result] Based on the existing research results of porous medium burners, the feasibility of using porous medium burner for ammonia reforming to produce hydrogen is analyzed. On this basis, the research methods, research contents and technical routes of ammonia reforming for hydrogen production by using porous medium burner are summarized and prospected. [Conclusion] Obtaining the optimal design for the overall structure, microchannel, and reaction carrier structure of the porous medium burner and developing non-precious metal catalyst materials with good performance and low cost will be

收稿日期: 2022-08-19 修回日期: 2022-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“变负荷运行下旋流煤粉燃烧稳定性及 NO_x 生成特性研究”(52006120)

the main research directions of the porous medium burner for hydrogen production by ammonia reforming. The research in this paper can provide some theoretical and technical support for the development of the technology of hydrogen production by ammonia reforming with porous medium burner.

Key words: porous medium burner; adiabatic flame temperature; hydrogen; ammonia; low NO_x

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在“双碳”目标背景下,随着能源与环境问题的日益突出,对低碳清洁能源的需求日益增加。利用低碳或零碳燃料对煤炭、天然气等高碳含量燃料进行替代,从而降低化石燃料燃烧利用过程中的碳排放,是目前研究人员所关注的重点方向。氢能源是一种极具发展潜力的清洁能源,具有来源广、热值高、可储存、无污染等优点^[1]。由于来源的多样性,氢能的利用不受地域限制,可以发挥巨大的经济效益和环境效益,有望在包括电力、交通、钢铁、建筑在内等多个领域使用以实现深度脱碳。与同类型能源相比,氢具有突出的优势^[2-4]:(1)为高热值清洁燃料,燃烧利用过程中可实现无污染、零碳排放;(2)来源广泛,可来自化石燃料制氢、水分解制氢、工业副产氢等,也可来自水能、风能、太阳能、生物质能等可再生能源的制备;(3)适合规模化稳定存储及快捷运输,能够确保远距离运输及快速补充;(4)应用广泛,已应用于电力、航空、冶金等领域。在交通运输方面,氢能燃料电池发电效率高、启动快,除为车辆提供动力外,还可作为分布式发电、备用应急电源、深海载运工具等的动力源。

在氢能生产过程中,直接生产的主导技术是碳氢化合物的蒸汽重整,其他方法包括电解和热解等。全球约有 8 GW 的电解容量,约占全球氢产量的 4%^[5]。在国外方面,据估计,美国每年的氢气消耗量超过 1 100 万 t,占全球需求的 13%,其中石油精炼、氨(Haber 反应合成)和甲醇的生产中共消耗了二分之一以上的氢气^[5]。在原料方面,天然气仍是制氢的主要原料,约 80% 的氢气来源于天然气重整,其余大部分是石油炼化工业的副产氢。氢的生产曾被估价为 1 亿美元的产业^[6]。根据美国能源部的数据,2004 年全球共消费了 5 300 万 t 氢气^[7]。预计到 2050 年,我国氢气需求量将接近 6 000 万 t。

当前,我国已成为世界上最大的氢气生产国,年

产氢量约为 3 300 万 t,其中约 1 200 万 t 符合工业氢气质量标准,具有良好的工业基础。2022 年 3 月,国家发展改革委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》,明确了氢能在国家能源体系中的重要位置,以及在能源绿色低碳转型过程中的重要作用^[7]。

目前,规模化制氢技术的发展日趋成熟,然而在单兵电源、应急电源的燃料电池等领域,还存在紧凑型便携式制氢技术的巨大需求。文章立足于便携式高效氢气发生系统的研发需求,在总结已有制氢工艺的基础上,提出采用微小型绝热火焰温度多孔介质燃烧器的氨重整制氢技术路线,并分析了多孔介质燃烧器氨重整制氢的可行性、研究内容、研究方法及技术路线等,为绝热火焰温度燃烧器氨重整制氢技术的发展提供一定理论及技术支撑。

1 氢制备工艺及存在的不足

氢能的开发和利用首先必须解决氢的来源问题,重点关注制氢过程中的环保性、经济性及高效性。表 1 给出了典型制氢技术类型及特点。氢气的制备类型主要有化石燃料制氢、水分解制氢、生物质制氢等。化石燃料制氢又可细分为化石燃料制氢、煤制氢及甲醇重整制氢,是工业制氢的主要来源。天然气、石油、煤炭和电解水等方法制备氢气分别占世界氢产量的 48%、30%、18% 和 4%^[8]。相比于其他制氢技术,天然气制氢具有较好的经济性, CO_2 可以从天然气中分离出来,使制氢效率达到 60%~70%。具体过程为通过吸热反应将甲烷分子分解形成 CO 和 H_2 ,CO 通过蒸汽传递到氧化铁或其他氧化物上,并经历水气转换反应,获得更多的 H_2 。这一过程的缺点是副产品为 CO 和 CO_2 等温室气体^[8],产生 1 t H_2 的同时也会产生 9~12 t 的 CO_2 ^[9]。此外,煤制氢和甲醇重整制氢也会不同程度上存在高 CO_2 排放的共性问题,为绿色清洁燃料氢气的制备带来了

表1 典型规模化制氢技术方法及特点

Tab. 1 Typical large-scale hydrogen production technology methods and characteristics

制氢技术类型	制氢方法简介	优势	劣势	成熟度	未来趋势	
工业副产氢	丙烷脱氢、乙烷裂解、焦炉煤气	当前副产氢规模大,成本低	供给不稳定,纯度较低	成熟	发展与工艺配套的高效低成本提纯技术	
化石燃料制氢	甲烷重整制氢	甲烷水蒸气重整制氢、甲烷部分氧化重整制氢、甲烷二氧化碳重整制氢等	甲烷价格低廉、来源广泛,适合大规模制取	碳排放问题	成熟	当前主流技术,未来结合CCS技术可实现低排放,在化石燃料储量丰富的国家将持续占据重要地位
	煤制氢	煤炭经历气化、一氧化碳耐硫变换、酸性气体脱除、氢气提纯等环节	成本低,来源广泛,适合大规模制取	碳排放问题	成熟	
	甲醇重整制氢	甲醇与水蒸气在一定条件下发生甲醇裂解和一氧化碳变换反应,生成氢和二氧化碳	甲醇含氢量高,甲醇便于储存运输	碳排放问题	成熟	
水分解制氢	电解水	水分子在电极上发生电化学反应,分解成氢气和氧气	无排放问题	能源来源要求高,成本高	成熟	利用可再生能源
	热化学裂解水	水在高温下直接分解成氢气和氧气	无排放问题	能源来源要求高,成本高	研发	利用可再生能源
	光解水	在半导体的不同位置将水还原成氢气或者将水氧化成氧气	无排放问题,能源要求低	材料成本高	初期研发	深化机理研究,降低材料成本、提高氢转化率
生物质制氢	利用微生物在常温常压下进行酶催化反应制取氢气	无排放问题,能源要求低	占地面积大,难于大规模制取	初期研发	深化机理研究,实现规模化生产	

新的挑战。相比之下,以电解水、热化学裂解水、光解水为代表的水分解制氢技术,在制氢过程中无污染物排放问题,但存在对能源来源要求高及成本较大的不足。在制氢经济性方面,李庆勋等^[10]对比了煤制氢、天然气制氢、干气制氢路线的成本,计算得到单位制氢成本分别为0.96元/m³、1.21元/m³、1.32元/m³。不同类型制氢技术的经济性主要取决于原料资源的可得性及原料成本价格。为了同时减少制氢过程中的碳排放及降低制氢成本,可进一步将水分解制氢技术与可再生能源(风、光等)相结合,如利用可再生能源进行电解水制氢、可再生能源裂解水制氢、光解水制氢等,从而实现低碳、低成本及规模化制氢。

上述制氢技术类型主要针对于规模化制氢需求,然而部分重要场合也需要紧凑型便携制氢设备。以具有代表性的便携式燃料电池为例,其在应急电源、单兵电源、无人微型飞行器机载电源等领域均具有广阔的应用前景。这些关系到国防安全等的重要应用领域,都要求燃料电池系统配备简易、便携、安全及高效的制氢装置,从而增加关键设备的动力持久

性及运行可靠性。

2 氢的优良载体——氨

氨(NH₃)作为一种储氢燃料,目前主要应用于清洁剂和农业肥料的制备等,看似并不“理想”,但实际上氨的表现要远好于其味道^[11]。氢气必须冷却至-253℃才能被液化,这意味着氢气液化过程本身已经消耗了氢燃料三分之一的能量,并且储存氢气的容器需要特殊的隔热降温设施,成本高昂且危险性大。相比之下,氨是理想的氢载体,其含氢质量分数高达17.65%。氨气在较低压力下就可以在-10℃时被液化,能量损失少,液态氨的体积能量密度是液态氢的2倍,这意味着相同体积的容器可以储存更多的能量。在常规的氨运输中,通常选择冷却和加压存储的组合。液氢在-253℃和0.1MPa时的体积氢密度约为70kg/m³,液氨在-33℃和0.1MPa时的体积氢密度约为120kg/m³,液氨的体积密度约是液氢的1.5倍,因此与液氢相比,同等体积的氨可以输送更多的氢。目前,氨的合成、运输技术及其基础设施也日趋成熟。更为重要的是,氨本身不含碳元素,

因此在利用氨制备氢气的过程中,不再有 CO_2 等新的温室气体排出^[12-14]。对于氢能,制造业巨头 Siemens 也认为“氨易于存储、运输及使用,可以容易变成氮气和氢气。从诸多方面而言,氨都是理想的能量来源”^[11]。目前核心的问题在于,如何廉价、高效、绿色地通过氨制备氢。

3 多孔介质燃烧器重整制氢

3.1 多孔介质燃烧器研究概述

多孔介质燃烧技术具有污染物排放低、燃烧效率高等优点,兼顾燃烧器结构紧凑、体积小、宽负荷调节范围、稳定燃烧等优势。其商用价值主要在于通过部分氧化手段制氢、供暖/供热、动力设备、金属热处理、干燥过程及烹饪等多种民用及工业生产过程^[15-17]。目前,国内外相关研究人员对制备绿色清洁燃料氢气和多孔介质燃烧器开展了较为丰富的研究。在国内方面,褚金华^[18-19]等提出了渐变型多孔介质燃烧器的概念;王恩宇^[20]等通过实验发现渐变型多孔介质燃烧器下的燃烧场温度分布更加均匀,可同时兼顾低污染排放与高效燃烧;徐维广^[21]通过数值模拟证实了多孔介质燃烧器在减少 NO_x 方面的独特优势。在国际方面,对于多孔介质燃烧器的研究主要集中于美国、澳洲、加拿大、日本和欧洲等发达国家,研究主要聚焦于多孔介质内燃烧现象的基础理论研究^[22-23]。为了提高多孔介质燃烧器的效率,通过联合多孔介质固有的内热再循环效果和外热再循环,即对燃烧器的烟气余热进行回收利用,以及增加燃料预热和强化空气混合,可以促进燃料的稀薄燃烧过程^[24-25]。目前,由于便携式制氢设备的应用需求远小于规模化制氢,使得对便携式制氢设备的研究较少,也尚未有研究者利用绝热火焰温度多孔介质燃烧器进行以氨气为主要原料重整制备氢气的研究。

3.2 便携式多孔介质燃烧器重整制氢的可行性

在多孔介质燃烧器中,氨气重整制氢的反应为吸热反应。对于燃烧驱动的重整-燃烧系统,如果以传统自由火焰燃烧器为热量来源,则存在燃烧调控难度大、 NO_x 排放偏高的问题^[15]。相比于自由火焰燃烧器,使用多孔介质燃烧器进行便携式氨重整制氢的可行性具体包括:(1)多孔介质燃烧器体积小、结构紧凑,便于进行工艺集成,且启停方便;(2)理论

上可行,氨气由氮元素和氢元素组成,在合适温度及风量配比、催化剂类型等反应条件下,可直接分解为氮气和氢气;(3)多孔介质燃烧器可实现超焓燃烧,燃烧稳定性强,有望提高氨重整制氢的效率,且无碳排放,符合国家减碳政策要求。因此结合多孔介质燃烧器进行紧凑型便携式氨重整方法制氢,在原理、技术及政策上具有可行性,相关研究也具有非常重要的科学意义和应用价值。

图 1 给出了一种内置多孔介质的卷式燃烧器结构示意图。该燃烧器由中间燃烧室及外侧螺旋换热通道组成,螺旋换热通道可分为双向逆流进气通道与排气通道两部分,一般由不锈钢螺旋卷制而成。该燃烧器的燃烧室中,填充有呈“一”字形渐变的泡沫陶瓷片,且沿气流方向的孔径分布大小不一。为了防止恶性回火问题,在入口处堆积有陶瓷小球。同时,为了防止火焰温度过高烧毁燃烧室内壁面,在燃烧器外围采用耐高温绝热材料填充形成保温层,用于减少热量损失。相比于均匀型多孔介质,该卷式渐变型多孔介质布置具有更强的传热性能,能够增强燃烧的稳定性^[26],因此更加适用于氨的重整制氢需求。

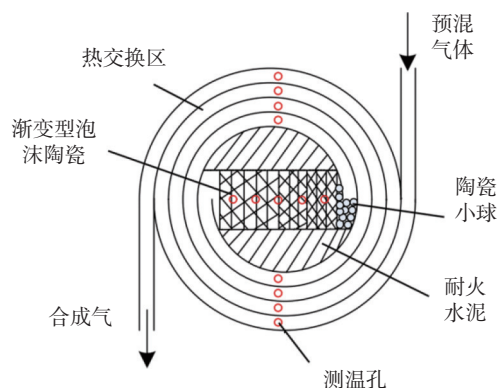


图 1 内置多孔介质的卷式燃烧器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a roll reactor with built-in porous medium

由于氨气火焰速度较低,远低于甲烷火焰速度,不宜直接与空气预混后发生燃烧化学反应,因此为了提高氨气的可燃性,在绝热火焰多孔介质燃烧器运行启动初期,在氨气与空气混合气中掺入适当比例的助燃气,如少量氢气或者甲烷等碳氢燃料,从而提高氨燃料的可燃性。表 2 详细对比了氨、氢和甲烷燃料的燃烧特性。

表2 氨、氢和甲烷的燃烧特性^[27]Tab. 2 Combustion characteristics of ammonia, hydrogen and methane^[27]

燃料	NH ₃	H ₂	CH ₄
低位体积热值/(MJ·m ⁻³)	14.3	10.8	35.9
最大层流火焰速度/(m·s ⁻¹)	0.07	2.91	0.37
可燃极限/%	0.63 ~ 1.40	0.1 ~ 7.1	0.5 ~ 1.7
最低着火温度/°C	650	520	630

4 多孔介质燃烧器氨重整制氢的研究内容及展望

4.1 总体研究思路推荐

通过采用超绝热火焰温度多孔介质燃烧器, 需实现低 NO_x 燃烧排放, 明确如何以 NH₃ 燃料, 制备纯绿色清洁燃料氢的机理及其最优化技术路线。具体而言, 以图1所示的内置多孔介质卷式燃烧器为例, 根据氨气、空气(与碳氢燃料进行掺混)预混燃烧自由火焰的相关机理, 研究获得以氨气为主要燃料多孔介质燃烧器的氨气燃烧特性及重整特性, 并采用合适的实验手段验证系统的可操作性和稳定性。在此基础上, 优化改进氨重整制氢的工艺和整体系统效率, 以获得适用于制备氢气的新型绝热火焰温度多孔介质燃烧器装置及工艺参数。研究过程中应重点关注3个方面: (1) 带有氨重整制氢系统的绝热火焰温度多孔介质燃烧器结构及工艺; (2) 多孔介质燃烧器中氨气-氢气/甲烷-空气的燃烧特性; (3) 高效制备绿色清洁燃料氢的最优运行及工艺参数。

4.2 研究方法推荐

为了研究获得清洁高效氨重整制氢的多孔介质燃烧器装置及系统, 可采用如图2所示的研究方法。考虑到数值计算(Computational Fluid Dynamics, CFD)作为一种快速经济, 且具有较强可靠性的研究方法, 目前已被广泛应用于多孔介质燃烧器的反应过程模拟研究中^[28-29], 因此可借助数值模拟方法指导多孔介质燃烧器的多孔介质材料选取、结构及尺寸参数优化设计。

在实验研究方面, 通过实验研究氨气-氢气/甲烷-空气预混气体在绝热火焰多孔介质燃烧器中的燃烧特性。具体可结合具有高时空分辨率的非接触式连续测量方法^[30], 以及热电偶测温、图像粒子测速、气

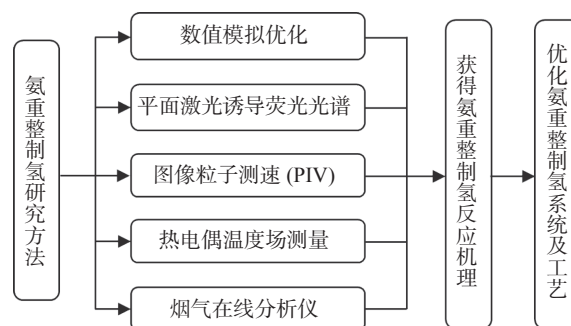


图2 多孔介质燃烧器氨重整制氢的研究方法推荐

Fig. 2 Recommended research methods for hydrogen production by ammonia reforming with porous medium burner

相色谱分析等测量氨重整后的流场、温度场及气体组分浓度分布。图3所示为一种典型的平面激光诱导荧光(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)测试系统示意图。通过平面激光诱导荧光测量温度场分布及氨重整制氢过程的中间产物自由基分布, 能够揭示预混氨气空气在绝热火焰温度燃烧器内燃烧、热解及 NO_x 生成机理。

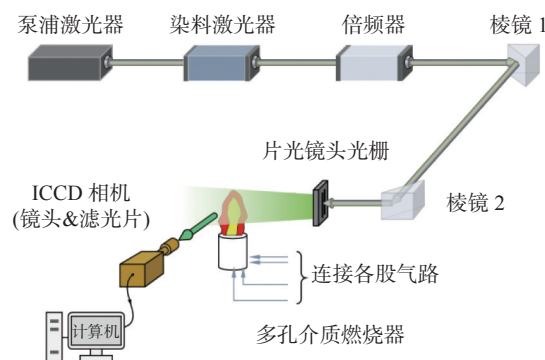


图3 平面激光诱导荧光实验系统

Fig. 3 The planar laser-induced fluorescence experimental system

4.3 氨气/空气/助燃气预混燃烧特性

为了研究获得清洁高效氨重整制氢的多孔介质燃烧器装置及系统, 首先应获得氨气/空气/助燃气的预混燃烧特性, 可参考采用的研究路线如图4所示。通过数值模拟优化燃烧器结构, 确定适合氨重整系统的多孔介质燃烧器构造, 并进一步结合图2所示的研究方法, 测量燃烧器和重整系统温度分布、多孔介质燃烧器速度及流场分布以及重整后气体组分浓度分布, 并计算得出氨气转化率及氢气生成率。综合分析可知, 获得绝热火焰温度多孔介质燃烧器氨重整制氢的反应机理。

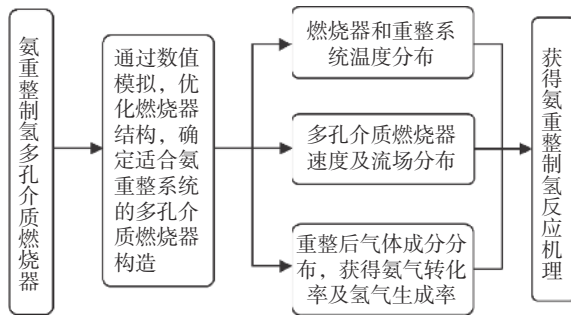


图 4 氨气/空气/助燃气预混燃烧特性研究路线推荐

Fig. 4 Recommended research route for ammonia/air/assistant gas premixed combustion characteristics

4.4 运行参数对氨重整制氢性能的影响

在认识氨气/空气/助燃气预混燃烧反应机理的基础上,对绝热火焰温度多孔介质燃烧器的运行参数开展研究,研究过程中应重点关注氨重整后气体的生成率、重整系统中投入氨气的转化率、整个系统的运行效率等。可参考采用的研究路线如图 5 所示。研究获得氨重整系统中不同的氢气/甲烷掺烧比率、氨气的投入速率、多孔介质燃烧器入口燃料-空气流速等关键运行参数、不同催化剂材料等,对多孔介质燃烧器性能、重整气体的产生率、投入氨气的转化率,以及整个系统效率的影响规律,从而优化氨重整制氢系统的运行性能,最终获得绝热火焰温度多孔介质燃烧器中制备绿色清洁燃料氢气的最佳运行参数范围及工艺系统。

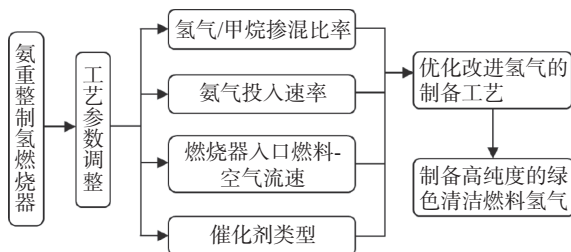


图 5 高效制备绿色清洁燃料氢气的研究路线推荐

Fig. 5 Recommended research route for efficient preparation of green and clean fuel hydrogen

5 结论

文章立足于便携式高效氢气发生系统的研发需求,在总结已有规模化制氢工艺的基础上,提出了采用微小型绝热火焰温度多孔介质燃烧器的氨重整制氢技术路线,分析了多孔介质燃烧器氨重整制氢的可行性,在此基础上,对多孔介质燃烧器氨重整制氢

的研究内容、研究方法及路线进行系统的分析和展望。具体为以氨气为清洁燃料,以微小型绝热火焰温度多孔介质燃烧器重整系统为对象,结合激光诱导荧光光谱、粒子图像测速等研究方法,阐明在多孔介质燃烧器中氨重整制取绿色清洁燃料氢气的详细机理,并且理论结合实验,研究关键运行参数对氨重整系统的气体发生率、氨转化率、氢气生成率,以及整体系统效率等方面的影响,最终为获得高效制备氢气的新型工艺方法,提供一定的理论及技术支撑。

目前尚未有研究者利用绝热火焰温度多孔介质燃烧器进行以氨气为主要原料重整制备氢气的研究,这有待后续结合理论分析及实验测量持续研究深入,具体可针对多孔介质燃烧器的整体结构、微通道、反应载体结构等开展优化设计,并开发性能良好、成本低非贵金属催化剂材料,获得多孔介质燃烧器氨重整制氢的优化技术及工艺参数,从而提高制氢效率并降低制氢成本。

参考文献:

- [1] 赵永志, 蒙波, 陈霖新, 等. 氢能源的利用现状分析 [J]. *化工进展*, 2015, 34(9): 3248-3255. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2015.09.007.
ZHAO Y Z, MENG B, CHEN L X, et al. Utilization status of hydrogen energy [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2015, 34(9): 3248-3255. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2015.09.007.
- [2] 蔡焱柳. 氢能及其应用前景分析 [J]. *能源与环境*, 2008(5): 39-41. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2008.05.016.
CAI C L. Analysis of hydrogen energy and its application prospect [J]. *Energy and environment*, 2008(5): 39-41. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2008.05.016.
- [3] 毛宗强. 我国发展氢能的战略建议——从“浅绿”到“深绿”(下) [J]. *太阳能*, 2009(2): 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2009.02.002.
MAO Z Q. Strategic suggestion on the development of hydrogen energy in China: from light green to deep green II [J]. *Solar energy*, 2009(2): 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2009.02.002.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年) [R/OL]. (2022-03-23) [2022-12-29]. http://zfxgk.nea.gov.cn/1310525630_16479984022991n.pdf.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Medium and long-term planning for the development of hydrogen energy industry (2021-2035) [R/OL].

- (2022-03-23) [2022-12-29]. http://zfxgk.nea.gov.cn/131052563_0_16479984022991n.pdf.
- [5] DECOURT B, LAJOIE B, DEBARRE R, et al. Hydrogen-based energy conversion, more than storage: system flexibility [M]. Paris: SBC Energy Institute, 2014.
- [6] Virginia Tech. Breakthrough in hydrogen fuel production could revolutionize alternative energy market [EB/OL]. (2013-04-03) [2022-12-29]. <https://phys.org/news/2013-04-breakthrough-hydrogen-fuel-production-revolutionize.html>.
- [7] Energy Information Administration. The impact of increased use of hydrogen on petroleum consumption and carbon dioxide emissions [R]. Washington: Energy Information Administration, 2008.
- [8] PRESS R J, SANTHANAM K S V, MIRI M J, et al. Introduction to hydrogen technology [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [9] COLLODI G. Hydrogen production via steam reforming with CO₂ capture [C]//Associazione Italiana Di Ingegneria Chimica. 4th International Conference on Safety and Environment in the Process Industry 2010, Florence, 14-17 March, 2010. Milano: Associazione Italiana Di Ingegneria Chimica, 2010: 37-42.
- [10] 李庆勋, 刘晓彤, 刘克峰, 等. 大规模工业制氢工艺技术及其经济性比较 [J]. *低碳化学与化工*, 2015, 40(1): 78-82. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9219.2015.01.021.
- LI Q X, LIU X T, LIU K F, et al. Technical and economic analysis for large-scale industrial hydrogen production [J]. *Low-carbon chemistry and chemical engineering*, 2015, 40(1): 78-82. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9219.2015.01.021.
- [11] 梁前超, 赵建锋, 梁一帆, 等. 储氢技术发展现状 [J]. *海军工程大学学报*, 2022, 34(3): 92-101. DOI: 10.7495/j.issn.1009-3486.2022.03.016.
- LIANG Q C, ZHAO J F, LIANG Y F, et al. Progress in hydrogen storage technology [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2022, 34(3): 92-101. DOI: 10.7495/j.issn.1009-3486.2022.03.016.
- [12] AKANSU S O, TANGÖZ S, KAHRAMAN N, et al. Experimental study of gasoline-ethanol-hydrogen blends combustion in an SI engine [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2017, 42(40): 25781-25790. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.014.
- [13] KIM J H, KWON O C. A micro reforming system integrated with a heat-recirculating micro-combustor to produce hydrogen from ammonia [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2011, 36(3): 1974-1983. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.043.
- [14] EZZAT M F, DINCER I. Development and assessment of a new hybrid vehicle with ammonia and hydrogen [J]. *Applied energy*, 2018, 219: 226-239. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.012.
- [15] 朱本奥, 匡勇, 刘柳, 等. 多孔介质燃烧器研究 [J]. *应用能源技术*, 2015(2): 30-33. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3230.2015.02.009.
- ZHU B A, KUANG Y, LIU L, et al. Study of porous medium burner [J]. *Applied energy technology*, 2015(2): 30-33. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3230.2015.02.009.
- [16] WU H, KIM Y J, VANDADI V, et al. Experiment on superadiabatic radiant burner with augmented preheating [J]. *Applied energy*, 2015, 156: 390-397. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.07.062.
- [17] MUJEEBU M A, ABDULLAH M Z, BAKAR M Z A, et al. Applications of porous media combustion technology – a review [J]. *Applied energy*, 2009, 86(9): 1365-1375. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.01.017.
- [18] 褚金华. 渐变型多孔介质燃烧器的研究与开发 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- CHU J H. Study and development of a gradually-varied porous media burner [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [19] 褚金华, 程乐鸣, 王恩宇, 等. 预混天然气在多孔介质燃烧器中的燃烧与传热 [J]. *燃料化学学报*, 2005, 33(2): 166-170. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2409.2005.02.008.
- CHU J H, CHENG L M, WANG E Y, et al. Combustion and heat transfer of premixed natural gas in a porous media burner [J]. *Journal of fuel chemistry and technology*, 2005, 33(2): 166-170. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2409.2005.02.008.
- [20] 王恩宇, 程乐鸣, 骆仲决, 等. 天然气在渐变型多孔介质中的预混燃烧启动特性 [J]. *燃烧科学与技术*, 2007, 13(5): 393-397. DOI: 10.3321/j.issn.1006-8740.2007.05.003.
- WANG E Y, CHENG L M, LUO Z Y, et al. Experimental studies of the startup characteristics of premixed combustion of natural gas in the gradually-varied porous media [J]. *Journal of combustion science and technology*, 2007, 13(5): 393-397. DOI: 10.3321/j.issn.1006-8740.2007.05.003.
- [21] 徐维广. 自然堆积多孔介质燃烧及换热实验研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2012.
- XU W G. Experimental investigations of combustion and heat transfer in natural-stracking porous media [D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2012.
- [22] MÖßBAUER S, PICKENÄCKER O, PICKENÄCKER K. Application of the porous burner technology in energy-and heat-engineering [C]//Eur. Comm., Comm. Eur.. Proceedings of the Fifth International Conference on Technologies Combustion for a Clean Environment (Clean Air 3), Lisbon, July 12-15, 1999. Danbury: Begell House, 2002: 185-198.
- [23] SCHEFFLER M, COLOMBO P. Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications [M]. Weinheim: Wiley, 2005: 484-508.
- [24] ECHIGO R, KURUSU M, ICHIMIYA K, et al. Combustion

- augmentation of extremely low calorific gases: application of the effective energy conversion method from gas enthalpy to thermal radiation [J]. *Transactions of the Japan society of mechanical engineers series B*, 1985, 51(464): 1297-1303. DOI: [10.1299/kikaib.51.1297](https://doi.org/10.1299/kikaib.51.1297).
- [25] XU K, LIU M H, ZHAO P H. Stability of lean combustion in mini-scale porous media combustor with heat recuperation [J]. *Chemical engineering and processing - process intensification*, 2011, 50(7): 608-613. DOI: [10.1016/j.ccep.2011.03.001](https://doi.org/10.1016/j.ccep.2011.03.001).
- [26] 李永玲. 甲烷在内置多孔介质卷式反应器内富燃制氢的数值研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- LI Y L. Numerical study of hydrogen production from rich methane combustion in built-in porous media Swiss-roll reactor [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.
- [27] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power [J]. *Progress in energy and combustion science*, 2018, 69: 63-102. DOI: [10.1016/j.peccs.2018.07.001](https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.07.001).
- [28] 史俊瑞. 多孔介质中预混气体超绝热燃烧机理及其火焰特性的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- SHI J R. Combustion mechanism and flame characteristics of the superadiabatic combustion of premixed gases in porous media [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [29] 解茂昭, 马坤, 芦宁, 等. 甲烷在多孔介质中过滤燃烧制氢的数值模拟 [J]. *热科学与技术*, 2009, 8(1): 69-73. DOI: [10.3969/j.issn.1671-8097.2009.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-8097.2009.01.013).
- XIE M Z, MA K, LU N, et al. Numerical simulation of methane-air filtration combustion in porous media for hydrogen production [J]. *Journal of thermal science and technology*, 2009, 8(1): 69-73. DOI: [10.3969/j.issn.1671-8097.2009.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-8097.2009.01.013).
- [30] 刘涛, 纪军, 齐飞, 等. 我国燃烧领域的基础研究进展 [J]. *中国科学基金*, 2012, 26(6): 325-329. DOI: [10.16262/j.cnki.1000-8217.2012.06.002](https://doi.org/10.16262/j.cnki.1000-8217.2012.06.002).
- LIU T, JI J, QI F, et al. Development of China's fundamental research in combustion [J]. *Bulletin of national natural science foundation of China*, 2012, 26(6): 325-329. DOI: [10.16262/j.cnki.1000-8217.2012.06.002](https://doi.org/10.16262/j.cnki.1000-8217.2012.06.002).

作者简介:



王子兴

王子兴 (第一作者)

1987-, 男, 内蒙古敖汉旗人, 工程师, 硕士, 主要从事工业炉设计及研究工作 (e-mail) wangzx24@cnoc.com.cn。



宋民航

宋民航 (通信作者)

1986-, 男, 黑龙江绥化人, 副研究员, 博士, 主要研究方向为燃料低碳清洁高效燃烧及储热系统优化集成 (e-mail) songminhang@126.com。

(编辑 叶筠英)