

氢能产业链上游技术演化研究

王佳晨¹，李子彪¹，张朝宗²

(1.河北工业大学经济管理学院，天津 300000；2.河北省科学技术情报研究院，河北 石家庄 050021)

摘要：“双碳”背景下，氢能作为典型清洁能源备受关注。氢能产业链上游是核心技术，可对中下游形成引导指向作用。研究产业链上游技术发展态势，有助于整体把控这一跨学科领域，对氢能产业的统筹管理与发展规划至关重要。借助关键词分析和LDA主题模型，分析上游技术节点和各领域发展态势。研究表明，氢能产业链上游技术节点覆盖制氢技术、制氢材料和制氢装置三大类技术知识，研究热点多集中在可再生能源制氢、催化剂材料、电极材料等方面。在产业链视角下，丰富氢能产业链上游技术研究广度与深度，对未来氢能产业链上游管理与发展具有指导意义。

一、引言

氢能产业链上游是产业技术脉络的关键所在，是与近年提出的“双碳”政策密切度最高的环节，从产业链视角分析可以更好把握其整体概况。当前对氢能产业链上游技术的探索，没有满足氢能产业技术发展趋势的研究需要，需要用系统性的思维和方法研究其发展，极大地改善未来社会、经济和科技的不确定性^[1]。

从现有研究来看，氢能产业链上游技术的运用和发展模式成为关注焦点，通过政策研究、实验研究等方式对氢能产业链上游具体技术的流程、发展现状和应用状况展开分析。本研究认为有必要对氢能产业链上游技术演化进行研究，为未来氢能产业研究提供理论依据，找到技术创新的关键突破口。

二、数据与方法

(一) 氢能产业链上游界定

根据《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》^[2]、《氢与氢能》^[3]和《中国氢能产业政策研究》^[4]

，本文将氢能产业链上游界定为从原材料投入制取氢气，到分离提纯得到高纯度氢气整个阶段。

在《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》中提到，制氢方法具备的工艺和国家标准中，涵盖材料、设备及系统技术等内容。其次，根据产业链是由多个相互连接的产业所构成的完整链条，是不同企业构建的链网环节，因此将上游涵盖技术范围划为制氢技术、制氢材料和制氢装置相应技术，依据关键词中包含的上述产品或工艺流程划分节点。

(二) 研究设计

1. 关键词共

现是探索知识结构和研究热

点的有效途径之一，论文的关键词能够充分表达其内容

的思想^[5]。基于文献检索结果，借助CiteSpace制作关键词图谱，并总结出节点。

2. 氢能产业链上游技术演化分析，挖掘氢能产业链上游核心技术主题的演化过程。采用专利数据，提取专利文本信息并构建本地数据库，进行预处理。借助LDA主题模型，提取各专利的主要研究主题，通过主题强度和相似度分析，构建技术演化轨迹模型，分析技术的演进脉络。

(三) 数据收集

1. 选取制氢技术、制氢方法、制氢材料、制氢设备、制氢装置为检索词，时间范围为2012-2022。中国知网以学术期刊为检索范围，删除署名为课题组、编辑部及无作者的条目，最终得到共2349篇样本文献。WOS核心数据库文献类型为Article，语种为English，共12981篇样本文献。

2. 将氢能产业链上游节点划分作为依据，通过“智慧芽”全球专利数据库，获取氢能产业链上游技术领域专利数据。删除专利中应用领域涉及农业、服装业等不相关专利。删除没有申请年、外观设计专利和没有专利分类号的专利。选取1992—2021年，共13408条数据。

三、结果与分析

（一）氢能产业链上游技术节点划分

氢能产业链上游涉及众多产业交叉融合与技术创新。由于产业链的概念涉及产品链、供应链、技术链等多链融合概念，因此氢能产业链上游范围则由制氢技术、制氢材料和制氢装置构建。制氢技术分为：化石燃料制氢、工业副产氢、电解水制氢、化工原料制氢、水解制氢、太阳能制氢、生物制氢、分离提纯。制氢材料分为：电极材料、催化剂、光催化材料、微生物制备、分离材料。制氢装置分为：电解槽、分离提纯装置、能量收集与转换装置、气体发生装置、气液分配与储存装置、工程元件、氢液化装置。制氢技术节点表示制氢工艺技术，制氢材料或制氢装置节点表示制备或建造它的技术及其参与制氢过程的应用技术。

（二）氢能产业链上游技术演化结果分析

1.主题挖掘结果

通过LDA主题提取，得到37个主题 - 特征词分布，进一步通过人工处理，剔除特征词分类极不明确的主题，根据每一主题下特征词，归纳出氢能产业链上游技术中各主题的含义，但主题内容不唯一，将所有主题分为制氢技术、材料研究、装置研究、性能研究和系统管理五个方向，以上技术基本构成制氢系统，与节点划分结果基本一致，如图1所示。

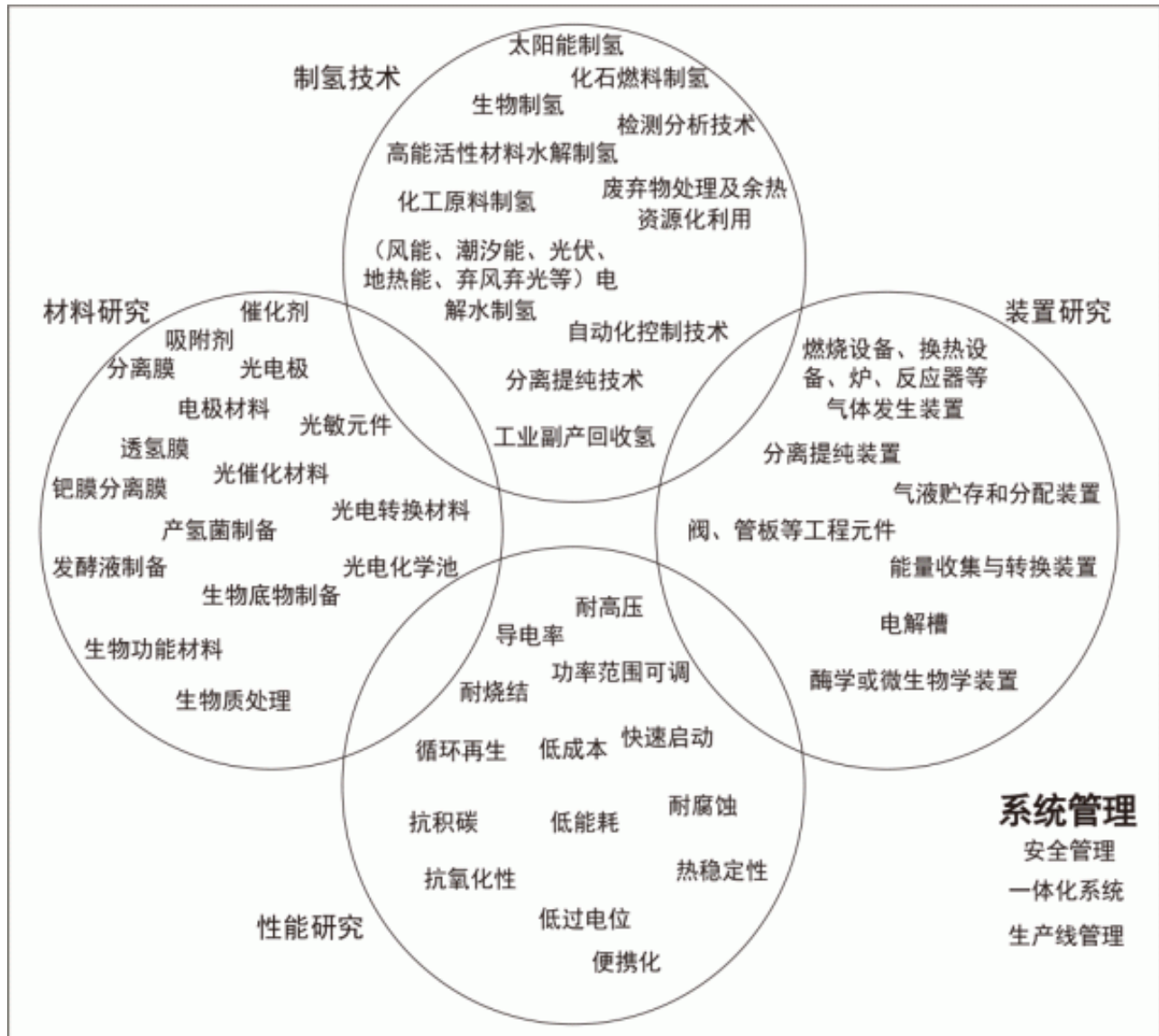


图 1 氢能产业链上游技术主题挖掘结果

2. 主题强度演化结果

主题强度能反映主题动态发展过程。基于LDA的结果，计算各时间切片下各技术主题强度值，制作制氢技术、材料研究和装置研究的主题强度演化折线图。

从制氢重要技术主题演化强度看，制氢技术顺应社会发展，从化石燃料制氢向可再生能源制氢研究转变。电解水制氢技术和太阳能制氢技术主题强度变化幅度较大，总体呈现上升趋势。近年来，对可再生能源制氢技术的关注度持续上升，电解水制氢技术中，制氢速度、能量回收利用率、电耗、能量损失等方面研究较多，对太阳能的热能及光能综合利用开展更为深入的研究。化石燃料制氢强度波动大，但总体趋势无明显增长。生物制氢一直处于一个中等强度的状态，并无明显提升。生物制氢产氢量小且不稳定，相关技术成熟度不高，大多仍处于实验室研究阶段。化工原料制氢目前研究较多的是甲醇和乙醇，醇类制氢技术已相对成熟。智控及测试分析类技术主题强度呈缓慢上升态势，属于辅助类技术。

制氢技术效率的提升，大多源于材料性能的提升。光催化材料、电极材料和光电化学池组件总体趋势为大幅上升，研究重心呈现出向有利于可再生能源制氢发展的态势。其中，对纳米复合材料、合金材料、半导体材料的关注持续增强，均被应用于催化剂材料的制备，因此，对催化材料特性的研究保持持续高强度。微生物本体及底物制备一直保持在较低强度，生物制氢门槛受限。虽然生物制氢符合环保趋势，但其不稳定性及效率低导致研究进程缓慢。

装置研究在氢能产业链上游技术中属于辅助性研究，其随制氢技术的发展方向变动而变动。分离装置整体呈显著上升趋势，电解槽及配套装置一直保持高强度，能量收集与转换装置和气体发生装置强度波动较大，工程元件强度在第一阶段有较大幅度减小后保持平稳。对分离技术配套装置主要研究为变压吸附和膜分离技术，分离技术主要依靠吸附塔、压缩机和分离器进行。能量收集与转换装置主要应用于可再生能源转换能量，此类装置结合氢能技术可拓展至众多领域，全面带动可再生能源制氢发电技术水平。

3.主题相似度演化结果

为反映主题内容随时间变化的状况，将1992—2021年数据划分为每五年一个时间切片，计算各时间切片的主题之间相似度，作出氢能产业链上游技术演化图。

从主题内容演化来看，各研究方向还处在快速发展中，且各技术领域研究侧重点逐渐增多，覆盖面拓宽，未来各研究深度会持续加深，如何达到高效率、低成本、低污染的制氢，如何制备低损耗、智能化、低成本的材料与装置已成为研究关键。

从制氢重要技术主题看，制氢技术发展与应用正由化石能源向可再生能源方向转变。在20世纪末，传统大规模的制氢方法以天然气制氢、轻油制氢、水煤气制氢等为主，由于化石燃料制氢技术已经相对成熟，因此在技术优化上强度相对可再生能源弱。

电解水制氢技术中，碱性电解水最早出现，质子交换膜电解水已发展到初步商业化，阴离子交换膜电解水尚处于实验室阶段，固体氧化物电解水处于初期示范阶段^[6]

。低阻抗从最初碱性电解槽研发时就有研究^[7]

，对电流密度、电压、电耗、操作温度等方面也进行优化。电极材料和催化剂研究随着电解水技术的发展而发展。为降低制氢过程成本，降低贵金属负载量，非贵金属催化剂研究逐渐增多。通过风能、光伏、潮汐能等可再生能源发电制氢，是电解水研究热点。由于能源来源多样，在不稳定电能条件下，相应地提出了电解槽应具有安全、可靠和高效的制氢能力^[8]。

太阳能制氢在研

究初期还未找到以可见光为光源且稳

定性和重复性都良好的光解水能量转化系统^[9]

，但已经形成太阳能热化学分解水制氢工艺、铜氯工艺等。太阳能制氢主要在21世纪初开始增多，研究热点为光伏法、光热法、光电化学法。光热电化学法耦合制氢成为研究重点，致力于新型可见光响应光催化剂的研制、新型光催化产氢体系的拓展等研究。最初光催化剂的研究多数仅能吸收紫外光，因此实现可见光光解水，提高太阳光利用率是今后发展方向。开发出高效稳定的可见光响应催化剂，将异相结、异质结理念应用于光催化剂研究，提高光催化产氢活性。

生物制氢研究初期利用产氢菌在太阳光照射下制氢是国际热门课题，此时已成功分离此类产氢菌并进行了产氢试验

。最初发现能够进行光生物

水解制氢的蓝细菌和绿藻，具备效率高、耗能小、清洁

的优点^[10]

。多年来对藻种进行大量筛选，至今仍是生物制氢重点研究方向。截至目前，生物质制氢主要涵盖热化学制氢法、生物制氢法和电解法。除传统方式外，生物质热化学制氢衍生出生物质微波热解气化制氢、高温等离子体制氢等新型制氢技术，目前处于实验室阶段。生物制氢由于清洁和节能等优点，逐渐成为发展趋势，但由于反应条件及微生物特性，存在较高技术壁垒。

工业副产氢主要包含氯碱、轻烃利用、合成氨等方式副产氢，其关键在于杂质净化和产品氢气中微量杂质的控制，只有彻底解决这两个难题，才能长周期稳定地生产氢气。净化工艺所用仪器大多实现了智能化发展，即由计算机进行整个过程的操控，实现整个生产过程自动化。除此之外，变压吸附的吸附剂使用周期长、综合效益高等也是其所具备的优点。近几年主要改进冲洗流程、改进均压和时序、变压吸附与膜分离结合和计算机模拟优化。膜分离技术的优点是模块化、操作简单、投资小及回收率高等，缺点是氢气纯度不高，其与变压吸附存在互补性，因此联合技术日益受到重视。

四、结语

目前，氢能产业链上游领域的研究重心，多集中在耦合创新制氢工艺和催化剂研究，基础性研究初期相对匮乏，但

研究趋势在2010年后快速增长。氢能虽大多来源于化石燃料制取，但专利研究除优化化石燃料制氢外，逐步侧重于可再生能源制氢，太阳能制氢、生物制氢、可再生能源电解水制氢逐渐成为研究主流方向。制氢材料主要为催化剂研究，主要对催化剂的制备、性能、成分等方面进行优化，追求达到高活性、长寿命、低成本等目标。未来氢能产业必将是多种制氢方式并存、多元化发展的供给格局。

伴随能源科技革命，氢能产业以可再生能源为主的能源转型已初具规模。从氢能产业全链条看，我国主要发展上游技术环节，则把握上游技术发展情况，有助于发现先动优势。随着氢能技术加速攻关、制氢结构不断优化、基础设施逐步完善，分阶段达成氢能产业发展目标，构建涵盖交通、储能、工业等领域的多元氢能应用生态。

参考文献：

[1]袁立科，王书华. 走向系统性预测：中国的技术预测历程及实践[J]. 科学学与科学技术管理，2021，42（03）：3-15.

[2]中国氢能联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书[R].中国氢能联盟，2019.

[3]李星国. 氢与氢能[M]. 北京：机械工业出版社，2012.

[4]中国国际经济交流中心课题组. 中国氢能产业政策研究[M]. 北京：社会科学文献出版社，2020：1-266.

[5]YING D, CHOWDHURY G G, FOO S. Bibliometric cartography of information retrieval research by using co-word analysis[J]. Information Processing & Management, 2001, 37（06）：817-842.

[6]俞红梅，邵志刚，侯明，等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议[J]. 中国工程科学，2021，23（02）：146-152.

[7]倪萌，M.K.H.Leung，K.Sumathy. 电解水制氢技术进展[J]. 能源环境保护，2004（05）：5-9.

[8]BERGEN A, PITT L, ROWE A, et al. Transient electrolyser response in a renewable-regenerative energy system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34（01）：64-70.

[9]金振声，李庆霖. 关于利用太阳能光解水制氢的研究[J]. 化学进展，1992（01）：130-138.

[10]管英富，邓麦村，金美芳，等. 微藻光生物水解制氢技术[J]. 中国生物工程杂志，2003（04）：8-13.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/200012.html>