

行业视点

基于钽资源的固体氧化物燃料电池产业发展现状及建议

魏甲明, 陈宋璇, 李晓艳, 王玮玮, 付云枫

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 当前,我国以煤炭为主的火力发电为主要的能源供应方式,但煤炭资源使用存在资源不可再生、二氧化碳排放量大、环境污染严重等问题。固体氧化物燃料电池(SOFC)具有一次发电效率高、产物环境友好等优点,被公认为21世纪的革命性绿色能源技术之一。本文围绕SOFC系统未来主要发展方向,对SOFC系统中氧化锆基、氧化铈基、钙钛矿基电解质材料性能进行综述,指出基于钽资源的氧化锆基电解质材料是当下电解质材料产业化的优选路径。我国钽资源储量优势明显,钽资源供给能够保障燃料电池新能源产业链持续安全发展,因此,建议从国家层面加强资源供给链、制造产业加工链、产品应用链和回收链各环节的政策引导,做好顶层设计,加速钽基SOFC产业孕育,牢牢把握新一代能源产业变革浪潮。

[关键词] 钽资源;氧化锆基电解质;固体氧化物燃料电池;能源结构;绿色能源;能源产业;能源变革

[中图分类号] TM911 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2022)02-0001-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/ef.2022.02.001

0 引言

我国拥有丰富的煤炭资源,且集中式火力发电技术成熟、成本低、效率高,能够保障我国能源供应安全,因此,以煤炭为主的火力发电成为我国能源供应的最主要方式。但是煤炭属于不可再生资源,而且存在二氧化碳排放量大、环境污染严重等问题。风力和光属于清洁能源,至2020年风力、光伏发电

装机容量比例已增长至24%^[1-2],但风力、光伏发电具有间歇性和波动性强等固有缺陷,需要与其他能源方式耦合,共同解决能源结构转型的问题^[3]。

固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)具有一次发电效率高、产物环境友好等优点,被公认为21世纪的革命性绿色能源技术之一^[4]。该技术可以使用水煤气、工业副产氢气和可再生能源电解氢气作为燃料,既能充分利用我国丰富的煤炭资源来保证能源安全,同时能够降低化石燃料占比,降低碳排放。此外,该技术可以布置在电力应用端进行分布式发电,有效减少因长距离输送电力造成功率损耗。因此,固体氧化物燃料电池表现出的优越性能有助于我国能源结构的改变及转型。

本文围绕SOFC系统未来主要发展方向,对SOFC系统中氧化锆基、氧化铈基、钙钛矿基电解质材料性能进行综述,指出基于钽资源的氧化锆基电解质材料是当下电解质材料产业化优选路径的原因,最后从能源、资源的安全供给角度对我国SOFC

[收稿日期] 2022-02-15

[作者简介] 魏甲明(1981—),甘肃白银人,本科,正高级工程师,中国恩菲工程技术有限公司副总经理,从事冶金、化工和新材料领域技术研发、成果转化及管理工作。

[通信作者] 付云枫,辽宁鞍山人,博士,高级工程师,从事新能源材料开发、废旧锂离子电池回收、矿物提取冶金等方面的研究工作。

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2021YFC2902505);中国五矿科技专项计划项目(2019ZXA03)。

[引用格式] 魏甲明,陈宋璇,李晓艳,等.基于钽资源的固体氧化物燃料电池产业发展现状及建议[J].中国有色冶金,2022,51(2):1-9.

产业发展前景给出合理建议。

1 固体氧化物燃料电池发电性能参数及应用

1.1 发电性能参数

固体氧化物燃料电池是一种燃料电池。燃料电池通过电化学过程直接将化学能转换为电能,发电效率可达45%~60%^[5],按照电解质材料的不同,分为碱性燃料电池、质子交换膜燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池和固体氧化物燃料电池,

各类燃料电池的主要参数对比情况见表1。

当前技术较为成熟、应用前景广阔的燃料电池为质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池。质子交换膜燃料电池具有反应温度低、成熟度高及启动时间短等优点,适用于交通工具动力模块。固体氧化物燃料电池的燃料可以是氢气、甲醇、天然气等,适应性非常强,制作不需要贵金属,发电成本降低空间大,同时热电联产时能量转化效率高达90%。因此,固体氧化物燃料电池更适合作为分布式发电技术,具有更广阔的应用前景。

表1 各种燃料电池主要参数对比

Tab.1 Comparison on main parameters of various fuel cells

类型	碱性	质子交换膜	磷酸	熔融碳酸盐	固体氧化物
使用温度/℃	60~120	60~120	160~220	400~1 000	400~1 000
阳极	Pt/Ni	Pt/C	Pt/C	Ni/Al	Ni/YSZ(ScSZ)
阴极	Pt/Ag	Pt/C	Pt/C	Li/NiO	LaMnO ₃
电解质	KOH(溶液)	全氟硫酸膜(固)	H ₃ PO ₄	Li ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃ (溶液)	YSZ(固)、ScSZ
传导离子	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	H ⁺ 或O ²⁻
燃料	纯氢气	纯氢气	重整气	净化煤气、天然气、重整气	氢气、水煤气、天然气、生物质气
连接材料	有	无	有	有	有
腐蚀性	强	无	强	强	无
启动时间	1~6 min	<5 s	<5 min	>10 min	>10 min
效率	65%	40%~50%	40%~45%	50%~55%	65%~90%
应用方向	航空航天	新能源汽车	现场集成能量系统	电站、区域性供电	分布式电站、增程式电源、热电联供

固体氧化物燃料电池主要由阴极、阳极和电解质组成。作为电源时,氧化剂中的空气或氧气在阴极捕集电子形成氧离子,氧离子通过电解质传导到

阳极,在阳极表面氧离子与碳氢质燃料发生电化学反应,生成二氧化碳和水的同时向外电路输出电能^[6],其电化学反应原理示意如图1所示。

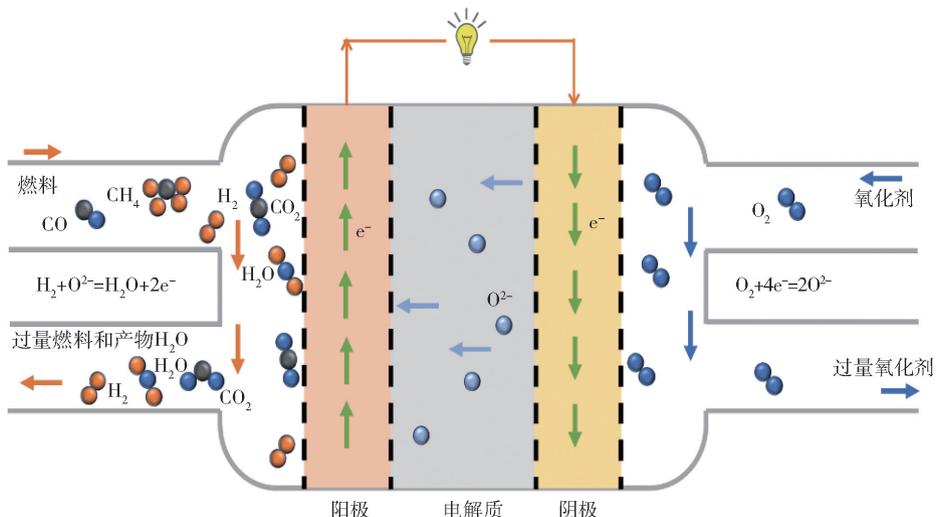


图1 固体氧化物燃料电池原理示意

Fig.1 Schematic diagram of solid oxide fuel cell

1.2 应用领域

固体氧化物燃料电池具有模块化的结构,能够根据用电功率要求进行组装,可以满足不同规模、不同层次的电力需要,广泛应用于便携式电源、分布式发电/热电联供系统和大型发电站等领域^[7]。

1.2.1 便携式电源

固体氧化物燃料电池具有静音、运行时间长、可靠性高、比能量高和机动性强等优势,因此被广泛应用于便携式电源领域^[8],此外,还因其不受天气限制,且噪声、红外和电磁辐射低^[9],在军用便携式电源领域具有广阔市场前景。明海等^[10]对现役单兵便携式电源进行了对比,在单兵执行 72 h 的任务中,需要的电量为 2.16 kW·h,采用锂离子电池,质量约 10.9 kg,体积约 9.5 L,采用燃料电池,则质量仅约 4.3 kg、体积仅约 4 L。

1.2.2 分布式发电

与其他燃料电池相比,固体氧化物燃料电池除具有热、电效率高的特点外,还具有操作温度高的特性,这使其在分布式能源系统中具有独特优势,高温发电过程中产生的废热品质高,可以实现热电联用,经过能量梯级利用后,可使系统同时达到较高的热电效率。此外,与集中式发电相比,分布式发电多建立在居民生活区域,对环境排放要求严格,而固体氧化物燃料电池发电过程不需要燃烧,产物洁净无污染,过程噪声小,环境影响小,是分布式发电的最佳选择^[11]。

吴傲寒等^[12]对家用 SOFC 热电联供系统进行了动态建模和分析,将高温发电过程产生的高阶蒸汽中的热能进行回收,为用户供热,实现了系统的二次能源利用,有效提高了系统整体的热电利用效率。赵玺灵等^[13]对固体氧化物燃料电池热电联用系统进行了研究,通过模拟计算,20 kW 电堆系统的热电连供效率可达 89% 以上。

1.2.3 大型发电

固体氧化物燃料电池的高效率和低排放特点使其有可能在大规模集中式电厂中得到应用^[14]。

张斌等^[15]将煤气化-固体氧化物燃料电池混合循环技术与整体煤气化联合循环技术进行了模拟仿真对比,固体氧化物燃料电池系统的混合循环效率可达 60% 以上,比煤气化联合循环高 10% 左右,而二氧化碳排放量可以降低至 560 ~

580 g/(kW·h),比煤气化联合循环低 16%。程健等^[16]对 1 MW 固体氧化物燃料电池发电系统进行了模拟和优化,包括天然气清洁脱硫、天然气重整、电化学反应、未反应燃料燃烧、废气预热原料气等过程,模拟和优化结果表明 1 MW 系统正常运行时所需的燃料、空气和水蒸气的流量分别为 0.054 kg/s、2.61 kg/s 和 0.241 kg/s,在此条件下,发电效率为 39.14%,发电效率较低的主要原因在于电堆中过量的燃料没有再循环利用,而通过燃烧进行处理。模拟结果能够为未来高温燃料电池发电系统的设计提供参考。

2 钒稳定氧化锆电解质材料

2.1 固态氧化物燃料电池电解质材料性能对比

在固态氧化物燃料电池中,电解质在高温下一侧暴露于氧化环境,另一侧暴露于还原环境,需要具备以下特征:①足够高的离子电导率,以最大程度减少内阻;②致密不透气的结构以隔绝阴、阳极;③高温下稳定的化学性质;④与阴、阳极具有良好的兼容性^[6, 17-19]。目前研制的固体氧化物燃料电池的电解质主要可以分为氧化铈系、钙钛矿系和氧化锆系^[20],3种电解质材料性能对比见表2。

表2 常见的3种电解质材料性能对比

Tab.2 Comparison on performances of three common electrolyte materials

参数及应用情况	氧化铈系	钙钛矿系	氧化锆系
运行温度/℃	500 ~ 700	700 ~ 800	600 ~ 800
电导率/(S·m ⁻¹)	80 (650℃)	11.3 (800℃)	10 ~ 16 (750℃)
稳定性	铈易被还原	钙会流失	较稳定
应用情况	实验室	实验室	商业化产品

氧化铈基电解质材料中的铈元素在还原气氛条件下容易从 +4 价被还原成 +3 价,在温度波动升高后,电解质材料的结构易被破坏而导致性能下降^[6, 18];钙钛矿基电解质材料中的 Ca 会随着使用时间的增加而流失^[21],导致其性能下降。因此,这两类电解质材料目前局限于实验室研发阶段,而氧化锆基电解质材料性能较稳定,已经成功应用于商业化产品。

2.2 钒稳定氧化锆电解质材料

氧化锆具有单斜、四方和立方 3 种晶体结构,

其中,只有立方结构是离子导体。为使其在室温下也能成为离子导体,通常掺杂氧化铪,铪离子能够置换出部分锆,使氧化锆形成稳定的立方萤石结构,在室温下也具有离子导电性。

Stubican 等^[22]对氧化物掺杂进行了一系列研究,认为掺杂的氧化物应该满足以下3种条件:金属氧化物中金属的平均价态小于+4价,以保证其氧亚晶格中产生必要的氧空位;金属氧化物与氧化锆能够形成温度较低的固溶物;掺杂金属阳离子需有很强的正电性,以保证形成的立方相稳定。经过计算和筛选,认为Y, Ca, Mg, Sc, Ce, Nd, Bi, Yb的氧化物是合适的掺杂剂,而氧化铪中铪离子半径为0.087 nm,与立方氧化锆中锆离子0.084 nm的离子半径最为接近,因此氧化铪被认为是最合适的氧化锆掺杂剂^[23-25]。

由于掺杂量和工作温度对物相结构影响较大, Yashima^[26]总结了6种 Sc_2O_3 - ZrO_2 的相图,并基于掺杂剂成本和电解质工作温度给出最常用的相图,结果表明:当掺杂量小于7.5%时,在200~850℃区间内,产物主要以四方相存在;当掺杂量在7.5%~10%时,四方相开始向立方相转变。Thornber 等^[27]研究认为:当掺杂量为9%时,产物仍以立方相为主,且此时电导率较高;当掺杂量大于10%以后,产

物中出现菱方相,对电解质的导电性、结构和机械性能有不利影响。氧化铪稳定氧化锆电解质的电导率为10~16 S/m,制成电池后,在2500~3000 A/m²时,功率密度可达1200~1450 W/m²^[19,28-29]。

综上所述,氧化铪稳定氧化锆电解质在离子导电性、化学稳定性等方面综合性能最佳,且与该电解质材料相匹配的阳极材料、阴极材料等材料经过多年研究也有较好的性能表现,因此,氧化锆基电解质材料,特别是氧化铪稳定氧化锆材料是当前最适宜大规模商业化的电解质材料。

3 铪资源现状

全世界铪资源总量约为200万t,主要集中在中、俄罗斯、澳大利亚、印度尼西亚等国^[30]。俄罗斯和乌克兰的铪资源主要伴生在钒钛磁铁矿中,含铪矿物储量可观,氧化铪的品位最高可达 1300×10^{-6} ;加拿大的铈矿和铀矿伴生有铪资源,平均品位在 $(25 \sim 108) \times 10^{-6}$;此外,印度尼西亚、澳大利亚和菲律宾的红土矿中也伴生有品位较高的铪资源^[31]。

我国铪资源总量约为70万t,占全球总储量的35%^[31]。与全球其他国家资源特点不同,我国的铪资源主要伴生于铝土矿、钒钛磁铁矿、钨矿和稀土矿中,主要分布及品位情况见表3。

表3 我国铪资源情况^[32]

Tab.3 Scandium resources in China

含铪矿物	铪资源分布
铝土矿	山西和河南铝土矿中 Sc_2O_3 平均品位为 $(110 \sim 150) \times 10^{-6}$;贵州广西铝土矿中 Sc_2O_3 平均品位为 $(40 \sim 75) \times 10^{-6}$
钒钛磁铁矿	攀枝花钒钛磁铁矿是我国大型的钒钛铁矿床,其中 Sc_2O_3 平均品位为 $(13 \sim 40) \times 10^{-6}$
钨矿	华南斑岩型和石英脉型钨矿具有较高的铪含量,黑钨矿中 Sc_2O_3 平均品位为 $(78 \sim 377) \times 10^{-6}$,最高可达 1000×10^{-6}
稀土矿	华南地区储量巨大的离子吸附型稀土矿中常伴生有 Sc_2O_3 平均品位超过 50×10^{-6} ,主要以胶态氢氧化铪存在;内蒙古白云鄂博铁、铈、稀土多金属矿床,其围岩中的 Sc_2O_3 平均品位超过 82×10^{-6}
其他矿物	广西贫锰矿中含有相当数量的铪, Sc_2O_3 平均品位超过 181×10^{-6} ,呈类质同象赋存于含铁矿物中,或呈胶体的细分散状态或吸附形式赋存于锰矿物中

我国目前以钛白废酸提铪工艺和红土镍矿提铪工艺为主。国内大部分的铪从钛白废酸中提取,该工艺存在铪含量低、酸度高、杂质铁钛含量高、提铪工艺复杂、成本高等问题,多为萃取工艺,常见的萃取剂有P204+TBP, Cyanex 272等。中国恩菲工程技术有限公司于2012年研发从红土镍矿中伴生铪资源中提取回收铪工艺,利用中间产物有效地将稀

散分布于提取工艺中的铪资源进行富集,再根据中间产物的组成特点,开发出高选择性萃取体系,定向提取制备氧化铪产品,整个工艺流程简单,成本优势明显。2019年,该公司设计的中冶瑞木新能源项目顺利投产,一期年产氧化铪20t,可有效保障我国燃料电池用铪资源的供给。

4 固体氧化物燃料电池产业现状

4.1 国外产业情况

欧美及日韩的固体氧化物燃料电池技术起步较早,经过多年技术积累及商业化推广,商业化程度较高,市场趋于成熟,产生了一批以 Bloom energy 公司、LG 化学、三菱重工和日本爱信精机为代表的世界知名企业。

Bloom energy 公司成立于 2001 年,该公司的固体氧化物燃料电池业务一直处于国际领先地位,其开发的固体氧化物燃料电池是第一个大规模、商业可行的发电平台,单电堆产品命名为 Bloom Box,多个电堆系统命名为 Bloom energy servers。谷歌公司在数据中心安装了 400 kW 的发电系统,成为其第一个客户。目前,该公司产品采用平板式电解质支撑单电池,陆续开发出 100~250 kW 单机发电系统,包括 ES-5000(100 kW)、ES-400(105 kW)、ES-5700(210 kW)、ES-5710(262.5 kW) 等型号,可以采用天然气或沼气作为燃料,发电效率达到 52% 以上。该公司电解质材料的供应基地集中分布于中国、欧洲和印度等国家的地区,主要制造工厂位于加利福尼亚州的森尼维尔和弗里蒙特以及特拉华州的纽瓦克,并专门建立了一个工厂回收燃料电池模块。此外,该公司在 2020 年与韩国企业 SK Ecoplant 成立合资企业,大力发展韩国本地供应商生态系统,并于同年 7 月投入运营^[33]。

LG 化学于 2012 年斥资 4 500 万美元收购了成立于 1992 年主要从事兆瓦级 SOFC 热电联产系统开发的 Rolls Royce Fuel Cell Systems (RRFCS) 51% 的股份,从此开始固体氧化物燃料电池行业的运营,该公司固体氧化物燃料电池产品采用扁管式结构,已经成功示范运行 200 kW 加压式 SOFC-uGT 发电系统,发电效率约 57%,连续运行超过 2 000 h^[34]。

三菱重工于 20 世纪 90 年代开始进行高温 SOFC 技术研发,在 1993 年开发出 1 kW 电堆,并稳定运行 3 000 h。1998 年开发出管式加压 SOFC 发电系统,最大输出功率 21 kW,运转时间超过 7 000 h,发电效率为 41.5%。2004 年开发出 75 kW 的 SOFC-MGT 联合发电系统,并于 2007 年将系统规模扩大到 200 kW。2013 年与东京燃气公司联合开发 200 kW 的 SOFC-MGT 联合发电系统,并在东京郊区连续运行 4 000 多

小时,发电效率 50.2%^[7]。

日本爱信精机株式会社成立于 1965 年,参与了日本政府推行的“ENE-FARM”家用燃料电池热电联产系统项目,从 2011 年 10 月开始提供发电功率为 700 W 的 SOFC 系统,该系统由爱信精机、大阪燃气、京瓷和长府制作合作开发和推行,可以使用管道天然气作为燃料,发电效率 46.5%,系统效率 90%,售价已从最初的 244 万日元下降到 2017 年的 175 万日元,至 2017 年 4 月,该系统已售出 20 万套左右^[7]。

4.2 国内产业情况

与欧美及日韩相比,国内固体氧化物燃料电池技术研发起步较晚,产品商业化程度较低,还未形成完善的产业链条,但苏州华清京昆新能源科技有限公司(以下简称“苏州华清京昆”)、潮州三环(集团)股份有限公司(以下简称“潮州三环”)和宁波索福人能源技术有限公司(以下简称“宁波索福人”)等企业已研制出原型设备并开展了一系列性能验证工作,国内市场目前处于孕育期。

苏州华清京昆创建于 2010 年,主要产品有固体氧化物燃料电池核心元件和关键材料、SOFC 发电系统、燃料电池测试系统、工程材料产品、热工装备、环保工程及相关服务等,其开发的 HS-201、HS-202 和 HS-203 发电系统功率从 50 W 到 5 000 W,系统发电效率可达 50%,产品寿命为 40 000 h 以上^[35]。

潮州三环从 2004 年开始研发生产 SOFC 电解质粉体材料,可生产加工比表面积 5~50 m²/g、纯度 99.99% 以上的高纯氧化锆粉,当前产能为每年 6 000 t^[36]。该公司生产的电解质粉体材料的主要客户为美国布鲁姆能源公司、澳大利亚陶瓷燃料电池公司。

宁波索福人能源技术有限公司在单电池、电池堆和系统集成 3 个层面的关键技术取得了一系列重大突破,其自主开发的 25 kW 燃料电池系统于 2021 年 1 月进行测试,系统发电功率可达 30.3 kW,发电效率 60.8%,燃料利用率达到 79.8%^[7]。

4.3 未来市场前景预测

在节能降碳成为全球能源与环境领域最大主题的背景下,虽然 SOFC 的市场成熟度距离风力发电和光伏发电还有差距,还处于孕育期,但鉴于此项技术在日本和欧美已有广泛应用,且市场发展良好,因此,随着分布式发电应用场景日趋成熟,预计 2025 年后,

分布式 SOFC 的装机容量有望达到我国当前火力发电装机容量的 5%，即 6 225.85 万 kW。按照当前 1 kW 容量需要使用 19.8 g 电解质粉计算，市场需要钪锆复合粉 1 232.7 t，以当前钪锆复合粉的市场价格 5 400 元/kg 计算，那么仅钪锆复合粉市场规模即可达到 66 亿元左右，带动的上下游产业链规模预计超过 500 亿。

5 基于钪资源的固体氧化物燃料电池的产业建议

我国在政策层面已经给予燃料电池产业极大支

持，为燃料电池产业的发展提供了保障，其中，《中国制造 2025》《节能与新型新能源汽车技术路线图 2.0》、国家“十四五”规划等均提出要大力发展燃料电池产业。面对分布式 SOFC 产业发展前景广阔的局面，我国还应建立健全钪基固体氧化物燃料电池的资源供应链、制造加工链、产品应用链和二次资源回收链的闭环产业链条(图 2)，争取下一个新能源产业变革的关键技术点。

5.1 资源端

当前世界主要的含钪矿产品以及大宗钪化工产品供应国为中国、俄罗斯和菲律宾，菲律宾为主要的

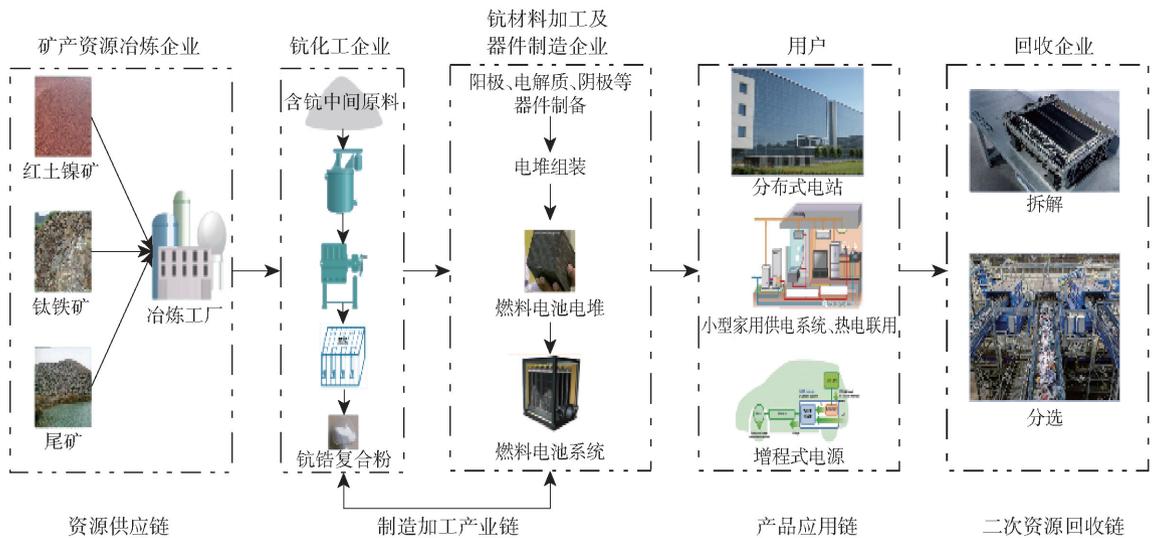


图 2 基于钪资源的固体氧化物燃料电池的产业链

Fig. 2 Industrial chain of solid oxide fuel cell based on scandium resources

含钪矿产品的供应国，但暂无大宗钪化工产品生产能力，大宗钪化工产品如氧化钪、氟化钪等产能集中在中国和俄罗斯。因此，从资源供给保障新能源产业安全发展的角度进行分析，按照我国现有火力发电功率容量 5.9×10^5 MW^[37] 测算，如将我国 70 万 t 钪矿资源全部制备成 SOFC 发电设备，其容量级别为 10^8 MW，是我国火电装机总容量的 160 余倍，是全球 2020 年发电功率容量 2.6×10^6 MW 的 38 倍多。

因此，建议国家相关部门应积极建立健全钪、锆及与固体氧化物燃料电池相关矿产资源的战略储备政策，将我国钪矿产资源优势、钪资源冶金原创优势技术、钪基材料加工技术等供应链优势，转化为以钪基固体氧化物燃料电池为代表的清洁新能源产业链培育优势。

5.2 材料加工端

钪锆复合粉是 SOFC 核心部件电解质的加工原料。作为产业链中游的钪锆复合粉加工企业，其上游是钪锆资源端，下游是 SOFC 产品制造端，因此，在下游 SOFC 产品应用市场尚未成熟时，氧化钪和氯化钪等基础原材料价格会影响中游材料加工企业的利润。

因此，建议国家相关部门积极跟踪钪锆等基础原材料市场价格，维护市场稳定供给，同时积极引导企业增加科研投入，降低生产成本，从全产业链降低产品价格，以培育 SOFC 下游应用市场。

5.3 产品端

欧洲、美国、日本和韩国在固体氧化物燃料电池领域的产品定位差距较大，以 Bloom energy 为代表的欧美企业制造的 SOFC 产品容量多大于 100 kW，

产品主要面向大型企业。在日本虽然三菱重工也开发并测试了200 kW SOFC-MGT联合发电系统,但以爱信精机和大阪燃气等多家企业联合开发的小容量的ENE-FARM家用燃料电池热电联产系统销量更好。

建议SOFC产品生产企业充分调研国家相关能源政策,深入研究当前各领域市场需求,确定合理的发展模式,做好SOFC产品的市场定位,形成产业集群,促进产业健康发展。此外,国家不仅应在能源政策的制定过程中给予SOFC技术一定的倾斜,而且在SOFC产业尚未成熟阶段,也给予相关中小微企业切实的财税补贴政策,以帮助SOFC产业快速健康发展。

5.4 用户端

建议国家按照SOFC产品功率进行分类,对于使用大功率SOFC产品的企业用户,按照SOFC产品的功率和使用时间给予节能环保补贴,并在税收方面按照节能降碳给予优惠。对于使用中小功率的个人用户,将SOFC产品以高节能等级增补入家电能效等级考核体系范围内,使用户在购买SOFC产品过程中给予实际能效补贴,降低个人用户购买SOFC产品的价格。还应对使用SOFC产品的用户给予更低的煤气或天然气价格,以进一步增强SOFC产品在市场的竞争力。此外,在市场方面,应积极鼓励和支持租赁等商业模式的探索,以降低用户一次性购买产品的费用。

5.5 回收端

SOFC产品中含有大量锆、钒、镧、铬、锰等有价金属。退役SOFC产品回收虽是整个产业链闭环运行的最后一个环节,但并不是产业链的尾端,产品回收端应提前嵌布在整个产业链条中。

建议国家相关部门积极制定政策引导回收链的建立,将回收链与资源端整合,提高资源提取端企业对二次资源回收利用率;将回收链与产品端整合,在SOFC产品设计生产过程中需充分考虑回收过程可行性和简易性,以降低回收成本;将回收链与用户端整合,当用户处理废旧SOFC产品时,应充分体现出SOFC产品中的资源价值,建立固定的回收渠道,完善回收链市场。

[参考文献]

[1] 国家能源局. 2019年全国电力工业统计数据[Z]. 2020. National Energy Administration. National power industry statistics

of 2019 [Z]. 2020.

[2] 国家能源局. 2021年全国电力工业统计数据[Z]. 2022. National Energy Administration. National power industry statistics of 2022 [Z]. 2022.

[3] 吴宝英, 邵冲, 黄豫, 等. 风光发电科学发展的关键在于统筹协调[J]. 中国电力, 2020, 53(9): 1-7. WU Baoying, SHAO Chong, HUANG Yu, et al. The Crux of Scientific Development of Wind and PV Power Lies in Overall Planning and Coordination [J]. Electric Power, 2020, 53(9): 1-7.

[4] LAGUNA-BERCERO M A. Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: a review [J]. Journal of Power Sources, 2012, 203(1): 4-16.

[5] 李长久, 李成新, 邢亚哲, 等. 阴极层结构对热喷涂制备SOFC输出特性的影响[Z]. 第六届全国氢能学术会议. 上海, 2005: 248-249. LI Changjiu, LI Chengxin, XING Yazhe, et al. Effect of cathode layer structure on output characteristics of SOFC prepared by thermal spraying [Z]. The 6th National hydrogen energy Academic Conference. Shanghai, 2005: 248-249.

[6] 韩敏芳, 彭苏萍. 固体氧化物燃料电池材料及制备[M]. 北京: 科学出版社, 2004. HAN Minfang, PENG Suping. Material and preparation of solid oxide fuel cell [M]. Beijing: Science Press, 2004.

[7] 韩敏芳, 吕泽伟. 固体氧化物燃料电池技术进展、产业现状和发展前景[Z]. 国际清洁能源论坛. 澳门. 2017. HAN Minfang, LV Zewei. Technical progress, industrial status and development prospect of solid oxide fuel cell [Z]. International Clean Energy Forum on technological progress, industrial status and development prospects of solid oxide fuel cells. Macao, 2017.

[8] 唐旭, 高文元. 燃料电池市场的突破—从传统汽车行业剑其他利基市场的转变[J]. 商场现代化, 2008, 15(1): 243. TANG Xu, GAO Wenyuan. Breakthrough in fuel cell market-transformation from traditional automobile industry to other niche markets [J]. Market Modernization, 2008, 15(1): 243.

[9] 王晓强, 刘江, 谢永敏, 等. 可用作便携式电源的高性能直接碳固体氧化物燃料电池组[J]. 物理化学学报, 2017, 33(8): 1614-1620. WANG Xiaoqiang, LIU Jiang, XIE Yongmin, et al. A high performance direct carbon solid oxide fuel cell stack for portable applications [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2017, 33(8): 1614-1620.

[10] 明海, 邱景义, 祝夏雨, 等. 军用便携式燃料电池技术发展[J]. 电池, 2017, 47(6): 362-366. MING Hai, QIU Jingyi, ZHU Xiayu, et al. Development of military portable fuel cell technologies [J]. Battery, 2017, 47(6): 362-366.

[11] 郑文迪, 蔡金锭. 微电网中SOFC发电系统控制策略的研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 24-26. ZHENG Wendi, CAI Jinding. Control strategy of SOFC generation system in microgrid [J]. Electric Power Automation Equip-

- ment, 2012, 32(5): 24-26.
- [12] 吴傲寒. 家用 SOFC 热电联供系统的动态建模与分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
WU Aohan. Dynamic modeling and analysis of domestic SOFC-CHP systems [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [13] 赵玺灵, 张兴梅, 段常贵, 等. SOFC 分布式热电联供系统的性能研究 [J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(5): 77-80.
ZHAO Xiling, ZHANG Xingmei, DUAN Changgui, et al. Performance research of SOFC distributed CHP system [J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(5): 77-80.
- [14] 马强强. 千瓦级固体氧化物燃料电池发电系统的设计与研究 [J]. 电池工业, 2021, 25(2): 73-76.
MA Qiangqiang. Design and research of kilowatt class solid oxide fuel cell power generation system [J]. Chinese Battery Industry, 2021, 25(2): 73-76.
- [15] 张斌, 倪维斗, 李政. IGCC 及煤气化-固体氧化物燃料电池混合循环的技术经济性分析 [J]. 中国动力工程学报, 2005, 25(1): 141-145.
ZHANG Bin, NI Weidou, LI Zheng. Techno-economic analysis of IGCC and hybrid systems of coal gasification and SOFC [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(1): 141-145.
- [16] 程健, 许世森. 固体氧化物燃料电池发电系统的模拟与优化研究 [J]. 热力发电, 2005, 12(1): 23-25.
CHENG Jian, XU Shisen. Study on simulation and optimization of solid oxide fuel cell power-generating system [J]. Thermal Power Generation, 2005, 12(1): 23-25.
- [17] 姜晓丽. 铈钪共掺杂锆基电解质材料的制备 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2011.
JIANG Xiaoli. Preparation of Ce and Sc co-doping zirconia electrolyte material [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2011.
- [18] 安德鲁·L. 迪克斯, 戴维·A. J. 兰德. 燃料电池系统解析 [M]. 张新丰, 张智明, 译. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2021.
DICKS L A, RAND A J D. Fuel cell systems explained [M]. Zhang xinfeng, Zhang Zhiming, trans. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [19] 刘薇. 钇稳定氧化锆固体电解质的性能及其应用研究 [D]; 上海: 上海师范大学, 2014.
LIU Wei. Study on Properties and Application of Ytria Stabilized Zirconia Solid State Electrolyte [D]. Shanghai: Normal University, 2014.
- [20] 李成新, 邢亚哲, 杨冠军, 等. 阳极组分对热喷涂制备 SOFC 输出特性的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(9): 1411-1415.
LI Chengxin, XING Yazhe, YANG Guanjun, et al. Effect of anode microstructure on performance of SOFC fabricated by thermal spraying [J]. The Chinese Journal Of Nonferrous Metals, 2005, 15(9): 1411-1415.
- [21] 李成新, 王岳鹏, 张山林, 等. 先进陶瓷涂层结构调控及其在固体氧化物燃料电池中的应用 [J]. 中国表面工程, 2017, 30(2): 1-19.
LI Chengxin, WANG Yuepeng, ZHANG Shanlin, et al. Microstructure development for application of thermal sprayed ceramic coatings to manufacturing of solid oxide fuel cells [J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 1-19.
- [22] STUBICAN V S, HINK R C, RAY S P. Phase equilibria and ordering in the system ZrO_2 - Y_2O_3 [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 61(1-2): 17-21.
- [23] DAROONPARVAR M, YAJID M A M, YUSOF N M, et al. Investigation of three steps of hot corrosion process in Y_2O_3 stabilized ZrO_2 coatings including nano zones [J]. Journal of Rare Earths, 2014, 32(10): 989-1002.
- [24] LV Xiaowei, ZHAO Jianling, WANG Xixin, et al. Novel Bi_2O_3 nanoporous film fabricated by anodic oxidation and its photoelectrochemical performance [J]. J Solid State Electrochem, 2013, 17(4): 1215-1219.
- [25] PATAKANGAS J, MA Y, JING Y, et al. Review and analysis of characterization methods and ionic conductivities for low-temperature solid oxide fuel cells (LT-SOFC) [J]. Journal of Power Sources, 2014, 263(1): 315-331.
- [26] YASHIMA M, KAKIHANA M, YOSHIMURA M. Metastable stable phase diagrams in the zirconia-containing systems utilized in solid-oxide fuel cell application [J]. Solid State Ionics, 1996, 86(1): 1131-1149.
- [27] THORNER M R, BEVAN D J M, SUMMERVILLE E. Mixed oxides of the type MO_2 (Fluorite)- M_2O_3 . V Phase studies in the systems ZrO_2 - M_2O_3 ($M = Sc, Yb, Er, Dy$) [J]. Journal of Solid State Chemistry, 1970, 1(3-4): 545-553.
- [28] 尹春宇. 钇稳定氧化锆中晶界结构与离子电导的关系 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
YIN Chunyu. Relationship between structure and ionic conduction of grain Boundary in YSZ [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [29] 荣爽. 氧化钪稳定氧化锆固体电解质的制备 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
RONG Shuang. Fabrication of Sc_2O_3 stabilized ZrO_2 solid electrolyte [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2014.
- [30] 刘云峰, 唐娴敏, 陈滨. 金属钪资源及我国回收利用技术 [J]. 湖南工业大学学报, 2014, 28(2): 56-59.
LIU Yunfeng, TANG Xianmin, CHEN Bin. Scandium resources and recycling technology in China [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(2): 56-59.
- [31] United States Geological Survey. Mineral commodity summaries 2021 [R], 2021.
- [32] 徐刚, 廖春生, 严纯华. 我国钪资源开发利用的战略思考 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(1): 232-5.

- XU Gang, LIAO Chunsheng, YAN Chunhua. Strategic thinking on the development and utilization of scandium resources in China [J]. The Chinese Journal Of Nonferrous Metals, 2001, 11(1): 232-5.
- [33] Bloom energy. Bloom energy 2021 年度报告 [R], 2022.
- Bloom energy. Annual report of Bloom energy 2021 [R], 2022.
- [34] 韩敏芳. 固体氧化物燃料电池(SOFC)技术进展和产业前景 [J]. 民主与科学, 2017, 5(1): 25-26.
- HAN Minfang. Technological progress and industrial prospect of solid oxide fuel cell [J]. Democracy & Science, 2017, 5(1): 25-26.
- [35] 钱锦, 程凌志, 杜晓佳, 等. 浸渍法制备高性能大尺寸 LSCF 阴极三层一体化电池 [Z]. 第 17 届全国固态离子学学术会议暨新型能源材料与技术国际研讨会. 包头: 2014.
- QIAN Jin, CHENG Lingzhi, Du Xiaojia, et al. High performance large-scale tri-layer cell with infiltrated LSCF cathode [Z]. The 17th National Conference on solid state ionics and International Symposium on new energy materials and technologies. BaoTou: 2014.
- [36] 潮州三环. 潮州三环 2021 公司年报 [R], 2021.
- Chao Zhou Three-circle. Annual report of 2021 [R], 2022.
- [37] 国家统计局. 中国统计年鉴 [Z]. 2021.
- National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook [Z]. 2021.

Development status and suggestions of solid oxide fuel cell industry based on Sc resources

WEI Jia-ming, CHEN Song-xuan, LI Xiao-yan, WANG Wei-wei, FU Yun-feng
(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The coal mainly thermal power generation is the main energy supply method; however, the use of coal resources has the issues of non-renewability of resources, large emission of carbon dioxide, severe environmental pollution, etc. The solid oxides fuel cell (SOFC) has the advantages of high one-time power generation efficiency, eco-friendly products and so on, which is recognized as one of the revolutionary green energy technologies in the 21st century. In this paper, review is made around the aspects of future development direction of SOFC system, the performance of the zirconium oxide based, cerium oxide based and perovskite based electrolyte material in the SOFC system, which points out that the scandium resource based zirconium oxide electrolyte material is the current optimal route for industrial production of electrolyte material. China has obvious advantage in scandium resource reserves, the supply of scandium resource can ensure the sustainable and safe development of the fuel cell new energy industrial chain, therefore, it is suggested that efforts be made in the national level to strengthen the policy guidance to all links of the resource supply chain, processing chain of manufacture industry, product application chain and recycling chain, and to make good top tier design to speed up the fostering of SOFC industry and firmly grasp the wave of the new generation of industrial energy transformation.

Key words: scandium resource; zirconium oxide based electrolyte; solid oxides fuel cell; energy structure; green energy; energy industry; energy transformation