西北大学学报(自然科学版)
2026 年 10 月,第 56 卷第 5 期,Oct. ,2026,Vol. 56,No. 5
Journal of Northwest University (Natural Science Edition)

·能源资源的绿色低碳转化与高效利用·

【主持人语】推进能源资源绿色低碳转化与高效利用,是落实“双碳”目标、守住能源安全底线、赋能经济社会高质量发展的重要举措。为破解能源低碳转型面临的基础科学难题与技术瓶颈,《西北大学学报(自然科学版)》特设“能源资源的绿色低碳转化与高效利用”专题,共收录来自西安交通大学、西北工业大学、中国科学院西北生态环境资源研究院、太原理工大学、桂林理工大学等高校与科研院所学者的 9 篇论文。这些文章围绕固体氧化物燃料电池、氢化镁储氢、深井装备温控、陶瓷膜烟气水热回收、酒糟水热催化气化、农村住宅低碳优化、甲烷重整膜反应器、相变微胶囊喷雾冷却、碳排放脱钩效应分析等研究方向,覆盖先进能源转化与储能技术、能源装备及热工过程、城乡能源低碳规划与区域碳排放评估三大板块,贯通微观反应机理、过程数值模拟、装备性能表征和区域低碳评估等研究维度。专题旨在揭示多尺度能源转化过程内在作用机制,探索能效提升与减碳增效协同路径,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提供理论支撑,同时助力能源绿色低碳技术的实践积累,推动能源领域科技创新。

【主持人】西安交通大学能源与动力工程学院　张剑飞教授、褚雯霄教授
西北大学化工学院　吴乐教授

固体氧化物燃料电池在农业能源转型中的应用

李致朋[1], 刘鑫超[1], 丁世豪[1], 鲁仰辉[2], 宋鹏翔[2], 叱干东东[1],冯　鹏[1]

1. 西北工业大学 柔性电子学国家重点实验室 & 柔性电子学研究所, 陕西 西安　710072;
2. 国家电投集团科学技术研究院有限公司, 北京　102209

摘要　在“双碳”战略与乡村振兴背景下,农业废弃物资源化利用和农村能源绿色转型亟须高效、清洁的能源转换技术。固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cells, SOFCs)具有发电效率高、污染物排放低、燃料适应性强等优势,可利用沼气、秸秆裂解气及生物质合成气等农业可再生资源,实现电、热及二氧化碳气肥的协同供给。围绕 SOFCs 的工作原理、关键电极材料调控及其在农村家庭能源供应、设施农业、新型农场和风光氢互补系统中的应用进行综述,探讨其在农业废弃物能源化、农村能源自给和农业清洁低碳生产中的应用潜力。SOFCs 可将分散的农业废弃物转化为稳定可用的清洁能源,为农业能源资源的绿色转化和高效利用提供新的技术路径。随着关键材料、系统集成和运行可靠性的持续提升,该技术有望拓展农村分布式供能、设施农业环境调控和低碳农场建设等应用场景,为新型农村能源体系建设提供支撑。

关键词　新农村建设;能源结构转型;固体氧化物燃料电池;生物质能
中图分类号:X71　　**DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-05-001

收稿日期:2026-07-30　　修回日期:2026-09-12
基金项目:国家重点研发计划(2024YFF0506300);新材料重大专项项目(2026ZD0623600);国家自然科学基金(12575033)。
第一作者:李致朋,男,教授,博士生导师,从事新能源燃料电池及产业化研究,iamzpli@nwpu.edu.cn。

Application of solid oxide fuel cells in agricultural energy transition

Li Zhipeng[1], Liu Xinchao[1], Ding Shihao[1], Lu Yanghui[2],
Song Pengxiang[2], Chigan Dongdong[1], Feng Peng[1]

1. State Key Laboratory of Flexible Electronics (LoFE) & Institute of Flexible Electronics (IFE), Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. State Power Investment Corporation Limited, Beijing 102209, China

Abstract Against the background of the "Dual Carbon" strategy and rural revitalization, the resource utilization of agricultural waste and the green transformation of rural energy urgently require efficient and clean energy conversion technologies. Solid oxide fuel cells (SOFCs) have advantages such as high power generation efficiency, low pollutant emissions, and strong fuel adaptability. They can utilize agricultural renewable resources such as biogas, straw pyrolysis gas, and biomass syngas to realize the coordinated supply of electricity, heat, and carbon dioxide fertilizer. This paper reviews the working principles of SOFCs, the regulation of key electrode materials, and their applications in rural household energy supply, facility agriculture, new-type farms, and wind-solar-hydrogen complementary systems; and discusses their potential application in agricultural waste energy conversion, rural energy self-sufficiency, clean and low-carbon agricultural production as well. SOFCs can convert agricultural waste into stable and usable clean energy, providing a new technical pathway for the green transformation and efficient utilization of agricultural energy resources. With the continuous improvement of key materials, system integration, and operational reliability, this technology is expected to expand its application scenarios in rural distributed energy supply, environmental regulation in facility agriculture, and low-carbon farm construction, thereby providing support for the development of a new rural energy system.

Keywords new rural construction; energy structure transformation; solid oxide fuel cells; biomass energy

2026 年中央一号文件《中共中央 国务院关于锚定农业农村现代化 扎实推进乡村全面振兴的意见》指出,农业农村现代化关系中国式现代化全局和成色,做好"三农"工作至关重要[1]。作为国民经济和社会发展的基础领域,"三农"问题不仅关系粮食安全、农民增收和农村社会稳定,也关系到资源利用方式、生态环境质量和乡村可持续发展水平。在乡村全面振兴持续推进的背景下,农业生产方式、农村生活方式和农民能源消费需求正在发生深刻变化,农村能源体系已成为支撑农业农村现代化的重要基础[2-3]。与此同时,碳达峰、碳中和目标的提出,使能源结构优化和绿色低碳转型成为国家能源战略的重要任务。因此,推动农村能源绿色低碳转型,不仅有助于提升农村能源供给能力和改善乡村生态环境,也是统筹推进"三农"工作与"双碳"战略的重要结合点。如何围绕农村构建清洁、高效、稳定的能源体系,已成为农村能源资源的绿色低碳转化与高效利用的重要问题。随着"十五五"规划的深入推进,农村能源转型被进一步提升至国家战略高度。国家明确提出建设多元互补的现代农村能源体系,推动生物质能、太阳能、风能等可再生能源在农村地区因地制宜开发利用,促进新能源与农业生产深度融合,加速农村能源革命与农业农村现代化协同推进。上述政策不仅为农村能源绿色低碳转型提供了制度保障,也为固体氧化物燃料电池等高效能源转换技术在农业领域的应用创造了有利条件。

现阶段,我国农村的主要能源来源还是以煤炭、液化气、天然气等为主的传统化石燃料,并混杂传统薪柴、秸秆等生物质燃料的直接燃烧利用[4-5]。即使是作为被寄予厚望的光伏技术,其在农村地区的规模化应用也暴露出一系列不容忽视的问题。总体而言,当前农村能源模式存在着难以忽视的结构性弊端:能源转化效率极其低下,导致资源浪费严重;伴随而来的污染物排放往往超标,对乡村生态环境构成持续压力;更重要的是,丰富的生物质资源未能实现梯级、高值化利用,其巨大潜力被严重低估和浪费(农村地区每年可能源化利用的生物质资源总量相当于 4.6 亿吨标准煤)。这些问题相互交织,不仅直接制约着乡村

人居环境的改善和生态宜居目标的实现,而且成为阻碍农业农村领域有效协同推进国家“双碳”战略目标的关键瓶颈。

在新能源技术中,固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cells,SOFCs)受到研究者和能源行业从事人员的广泛关注[6]。SOFCs 具备高发电效率(热电联供效率可达 80% 以上)、低污染排放、燃料适应性强等技术优势,特别适合直接利用农村常见的沼气、秸秆裂解气等生物质能源,满足农业温室对电、热和 CO_2 气肥的多重需求,能够显著提升农业生产系统的综合能效[7-9]。为直观印证上述技术优势在农业场景中的具体表现,表 1 将 SOFCs 与当前农村主流能源技术在同一套维度下进行横向量化对比,以便快速锁定其综合能效与环保优势。

表 1　SOFCs 与当前农村主流能源技术对比

Tab. 1　Comparison of SOFCs with current mainstream rural energy technologies

技术类型	效率	运行成本	环保性	稳定性	适用性
SOFCs	50% ~60%(发电) 80% ~90%(热电)	燃料廉价、维护少	低碳环保	24 h 连续运行	广大农村地区
光伏	15% ~22%	无燃料、设备折旧费高	低碳环保	昼夜波动	日照充足地区
风能	30% ~45%	无燃料、设备折旧费高	低碳环保	昼夜波动	风力资源丰富地区

本文从 SOFCs 的原理出发,系统归纳 SOFCs 灵活利用生物质燃料实现电 - 热联供的相关技术,为我国农业能源结构转型提供新思路。

1　新农村建设中的能源体系

新农村能源建设是中国新农村建设的重要组成部分,旨在实现农村现代化,缩小城乡差距,并促进农村经济、社会和环境的协调发展。新农村能源优化工作不仅关注能源的开发和利用,还致力于能源结构的调整,减少农业废物焚烧,保护环境和生态,提高农民的环境意识,改善生活方式,发掘新的能源更新体系,并形成新型能源利用方式为农村经济发展提供新的动力。

1.1　新农村能源发展的现状与问题

我国新农村能源工作起步较晚,面临复杂形势,存在资金不足、教育程度和宣传不足等问题,因此制约了农村的可持续发展。根据 2025 年 6 月 2 日《中国能源报》报道,目前我国乡村能源消费结构相对单一。尽管近年来清洁能源消费占比有所提升,但受资源禀赋影响,部分乡村取暖、炊事仍以煤炭为主,散烧煤问题突出。例如,在山东某调研地区,76.47% 的农户仍使用散煤,65% 的受访者对能源转型政策缺乏了解,部分太阳能设备因维护不足而遭到弃用。此外,乡村清洁用能还存在经济性不足、政策落实不到位和技术适配性不强等问题[10]。

1.2　农业废弃物新型能源化发展战略

农业活动所产生的大量且分布零散的废弃物,若未能加以妥善回收与利用,不仅会造成宝贵资源的流失,还可能对生态环境带来严重的负面影响。由于我国人口众多而资源相对匮乏,不仅要应对环境污染的严峻挑战,还要面对能源短缺对社会经济发展带来的负面影响。同时,随着农村生活水平的提高,能源消耗量也在增加,这无疑会加大能源供应的压力。将农业废弃物等生物质资源开发为可利用能源,已被视为缓解能源短缺与应对气候变暖的重要手段之一。

2025 年 4 月,首届农村能源行业发展大会指出:“农村不仅生产粮食,更可以成为零碳电力和零碳燃料的生产基地,为农民创造 30% 以上的额外收入”[11]。这为农村能源结构转型明确了核心路径,即就地开发利用可再生能源。其中,生物质能凭借其独特的优势,在农村能源结构低碳化、多元化转型中扮演着至关重要的角色。作为一种可再生、可替代化石燃料的绿色能源,生物质(如秸秆、家畜粪便、林业废弃物等)具有低硫、低灰分和高氢含量的特点,特别适合转化为清洁的气态或液态燃料(如合成气、生物甲烷等)。因此,将丰富的本地生物质资源转化为零碳电力和燃料,不仅能够显著提升农村地区的能源自给率和供应保障能力,减少对外部化石能源的依赖,也能从根本上优化农村传统的以散煤、薪柴为主的能源消费结构,实现清洁化、低碳化。因此在乡村振兴战略背景下,推动生物质能源的规模化、高值化利用,

是打通“资源变能源、能源变收入”链条,驱动农村能源结构实现全面、可持续转型的关键突破口。

然而,当前我国农村生物质能的利用仍存在低效化、粗放化路径依赖,尤其在分散式生活用能领域。以陕西省为例,尽管秸秆直燃比例在清洁能源普及下逐步降低,但在资源富集且替代能源覆盖不足的区域(如关中果区、渭北旱塬),传统利用模式仍具惯性。咸阳礼泉县通过“五化利用”模式(燃料化、基料化等),依托龙头企业年消纳农林废弃物超 100 万 t,加工成生物质颗粒燃料替代散煤,并推广清洁取暖炉 2 000 余户;西咸新区秦汉新城将 178 t 秸秆转运至垃圾焚烧厂发电,仅实现 510 kW · h/t 的低效能量产出,凸显生物质燃气发电环节的效率瓶颈,仍制约着农村能源结构的深度转型。当前,无论是秸秆直燃发电,还是分布式沼气工程,其电力转换效率普遍低于 40%,大量化学能以余热及未利用副产物(如沼渣、生物炭)形式耗散,导致资源价值折损。这一低效现状与乡村振兴战略中“清洁低碳、高效多元”的现代能源体系建设目标存在显著差距。

2 SOFCs 的基本原理

SOFCs 作为全固态的能量转换装置,以固体氧化物陶瓷电解质(如钇稳定氧化锆 yttria-stabilized zirconia,YSZ)构建氧离子(O^{2-})传导通道,通过非燃烧机制将燃料化学能直接转化为电能。燃料气体(含 $H_2/CH_4/CO$ 的生物质合成气或沼气)在多孔阳极界面发生电化学氧化释放电子,电子经外部电路形成电流;与此同时,通入阴极空气中的氧分子获得电子还原为 O^{2-},该离子穿越电解质抵达阳极三相边界(电极/电解质/燃料交汇区),与燃料组分反应生成 H_2O 与 CO_2,形成持续能量转换循环(见图 1)。此工作原理赋予 SOFCs 显著燃料灵活性(耐受≥15% 低氢含量及 $<10^{-6}$ 含硫杂质)、突破性能效优势(发电效率 > 60%,热电联供综合效率 > 85%)及近零污染特性(规避 NO_x 生成、CO_2 可捕集利用),使其成为耦合农村沼气工程与秸秆气化站、实现废弃物高效电能转化的理想技术载体[12]。

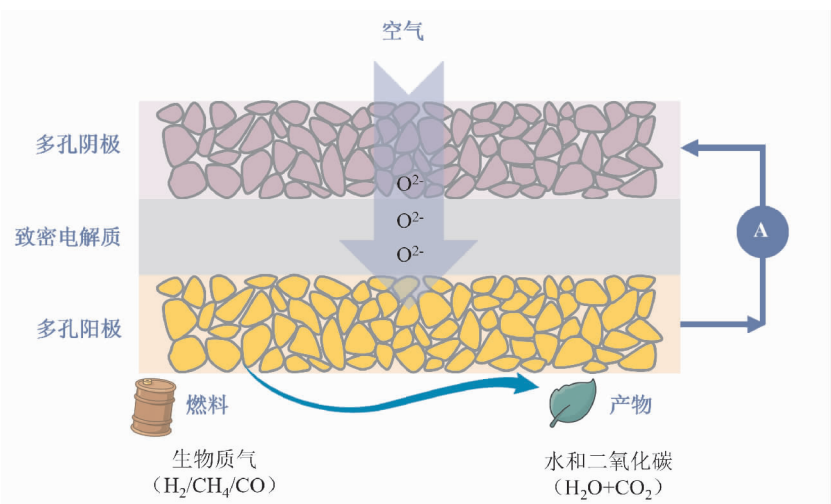


图 1 使用生物质气作为燃料的 SOFCs 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SOFCs using biomass gas as fuel

2.1 SOFCs 的阴极催化活性调控

SOFCs 由致密电解质、多孔阴极和阳极 3 个部分构成。阴极作为氧还原(oxygen reduction reaction,ORR)反应的场所,是 SOFCs 的关键组成部分之一[13]。阴极部分包括许多重要的过程,如吸附和解离、ORR、电子转移动力学和氧离子的输运。近年来,随着薄膜技术的发展,电解质所造成的欧姆阻抗已大幅下降,使得阴极活化损耗成为 SOFCs 极化损耗中的主要瓶颈问题,亟须重点突破[14-15]。基于此,增强阴极材料的电催化活性已成为 SOFCs 技术发展的关键研究任务。一种优秀的阴极材料除了需要满足电子导电率的要求外,还应具有许多独特的性能,如纳米级或微米级的颗粒,以确保高温下依然可以具有高比表面积和丰富的活性位,高孔隙率也意味着优化了氧运输的扩散动力学过程[16]。优秀阴极材料的其他性质,如良好的热性能、稳定的晶体形貌学特征和化学性质等可以确保其热匹配和稳定性。

如图 2 所示,阴极的 ORR 过程包括以下步骤。① O_2 在阴极表面被吸附并解离成 O 原子。② O 原子获得电子,生成 O^{2-}。③ O^{2-} 穿越阴极/电解质界面进入电解质中[17]。阴极材料可以包括钙钛矿型,如 $Ba_{0.95}Pr_{0.05}FeO_{3-\delta}$(BPF)[18]、$La_{0.4}Sc_{0.1}Sr_{0.5}MnO_3$(LScSM)[19]、$La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_{3-\delta}$(LSCF)[20]、$SrFeO_3$(SFeO)[21]、$SrTiO_3$[22] $Pr_{0.5}Ba_{0.5}Co_{0.7}Fe_{0.3}Ce_{0.2}O_{3-\delta}$(PBCFC)[23]等,双钙钛矿型,如 $PrBaCo_2O_{5+\delta}$(PBC)[24]、$NdBaCo_2O_{5+\delta}$(NBC)[25]、$GdBaCo_2O_{5+\delta}$(GBC)[26]、$LaBa_{0.5}Sr_{0.25}Ca_{0.25}Co_2O_{5+\delta}$(LBSCC)[27]、$NdBa_{0.5}Sr_{0.25}Ca_{0.25}Co_2O_{5+\delta}$(NBSCC)[28]、$PrBa_{0.5-x}Sr_{0.5}Co_2O_{5+\delta}$(PBSC)[29]、$Sr_2Fe_{1.5-x}Ni_xMo_{0.5}O_{6-\delta}$(SFNM)[30]、$Sr_2Fe_{1.3}Ga_{0.2}Mo_{0.5}O_{6-\delta}$(SFGM)[31]、$PrBaFe_{1.9}Zn_{0.1}O_{5+\delta}$(PBFZ)[32]等,以及 Ruddlesden-Popper 相钙钛矿氧化物,如 $La_{2-x}Sr_xNiO_{4+\delta}$(LSN)[33]、$La_2NiO_{4+\delta}$(LNO)[34]、$La_{2-x}Bi_xNiO_{4+\delta}$(LBN)[35]等。

在 SOFCs 中,阴极材料的 ORR 活性、稳定性及与电解质的相容性直接决定了其运行条件的适应能力。对于以农作物秸秆、畜禽粪便等为原料的生物质气为燃料时,运行温度选择至关重要。高温(>800 ℃)条件下,传统 $La_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$(LSM)阴极具有较高的 ORR 活性和热稳定性,但系统能耗大、材料热应力高,不利于农村小规模分布式能源的经济运行[36]。相比之下,中温(约 600 ℃ ~ 800 ℃)SOFCs 可显著降低热管理难度与能耗,同时与农村生物质气化发电的规模和运行条件更匹配,因此在农业能源转型中更具应用优势。目前,中温下运用最广泛的 LSCF 阴极可展现出优异的电化学催化性能,但其运行过程中易出现 Sr 元素表面偏析,导致活性下降与稳定性降低[37]。近年来,PBC、NBC、LSN 等新型阴极材料在中温条件下不仅展现出较高的 ORR 活性和一定的抗污染能力,而且针对其热稳定性不足和与电解质相容性较差等问题,已有多种改进方案被提出并验证有效[38]。得益于这些性能提升,这类材料在中温 SOFCs 系统中表现出良好的适配性与应用前景,有望在农村分布式生物质能源利用及农业能源转型中发挥重要作用。

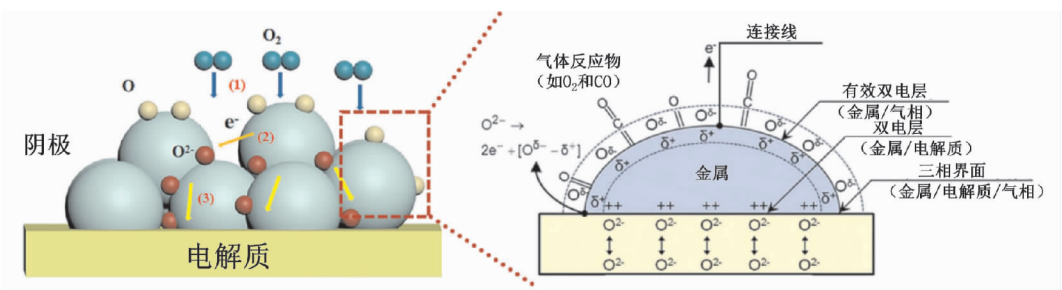


图 2　ORR 过程的示意图(据文献[17]修改)

Fig. 2　Schematic diagram of the ORR process

2.2　SOFCs 的阳极催化活性调控

当 SOFCs 以生物质衍生燃料(如沼气、秸秆合成气)为原料时,其多孔阳极面临严峻的积碳失活挑战[39-40]。例如 Ni-YSZ 阳极对氢气具有优异的电化学氧化活性,但生物质气中高浓度碳氢化合物(典型沼气含 CH_4 50% ~70% vol,秸秆合成气含 CO 15% ~40% vol)在镍催化剂表面易发生 C-C 键断裂反应,引发碳沉积并覆盖活性位点。Stoeckl 等[41]通过原位阻抗谱与气相色谱联用证实,在 650 ℃以上,CH_4 裂解产生的无定形碳可导致阳极孔隙率显著下降,其研究中观察到在特定测试条件下(如:650 ℃, 50% CH_4/H_2 混合气),阳极极化电阻(R_p)在数小时内可增加 300% 以上,严重劣化电化学性能〔见图 3(a) ~(c)〕。因此,针对生物质气组分复杂、易积碳的特性,开发新型抗积碳阳极催化体系,已成为提升 SOFC 在农村分布式能源等场景下长期运行耐久性(目标寿命 >40 000 h)的核心课题。

为解决抗积碳问题,Baldinelli 等通过进一步的研究,其认为解决甲烷燃料下积碳问题的关键是通过空气加入调节氧碳比,分离 CO_2〔见图 3(d) ~(f)〕[42]。此外,可通过 CH_4 预重整为合成气的方法克服沼气供气下 SOFCs 阳极积碳问题。如图 3(g)所示,展示了一种内重整过程,即直接在 SOFCs 腔体完成 CH_4 预重整,省去外置重整单元,利用电极反应所释放的热量供给重整过程,体系于 900 ℃纯甲烷环境连续运行近 200 h[43]。

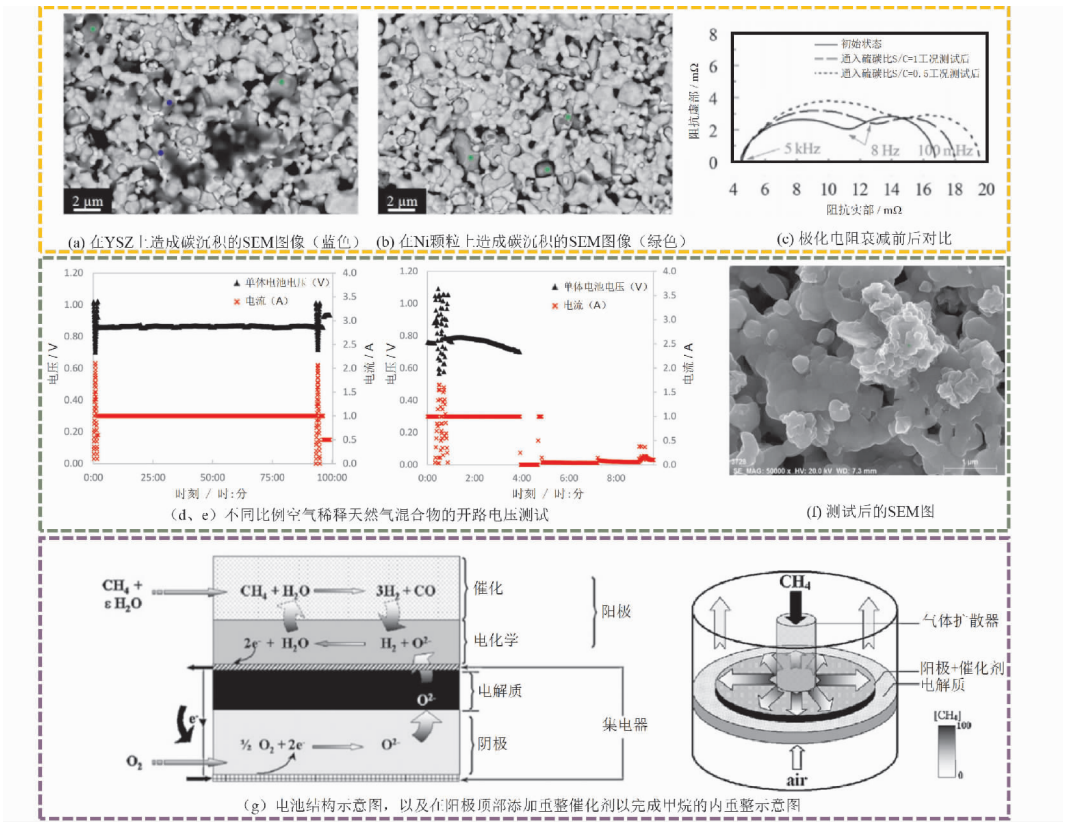


图 3 SOFCs 阳极催化活性调控策略（据文献[41-43]修改）

Fig. 3 SOFCs anode catalytic activity regulation strategy

3 SOFCs 在构建新农村能源体系的应用

对于在农村推进碳达峰与碳中和，不仅是实现农业生态文明建设的核心任务，也是深入实施乡村振兴战略的重要手段。实现这一目标的关键在于构建科学高效的技术体系，并推动农村能源结构的系统性优化。目前，我国农村能源体系仍以化石能源为主，居民生活中“非商品能源”消费占比较高，清洁能源与可再生能源的开发与利用仍显不足。与此同时，农作物副产物如秸秆、玉米棒等的直接焚烧现象普遍存在，已成为农业碳排放的重要来源。上述问题在一定程度上阻碍了农村地区的低碳化进程，亟须通过政策支持、技术迭代与资源高效利用等多重路径予以破解。

为实现农业农村碳减排和能源结构转型，农业生物质废弃物的综合利用至关重要。根据规划，到 2030 年，我国秸秆综合利用率需保持在 88% 以上。为此，2025 年全国两会提出加大对绿色能源项目的资金支持，通过绿色金融、税收优惠等措施，鼓励企业和地方政府投资农村能源基础设施。这些政策的措施为 SOFCs 等新能源技术在农村地区的应用提供了有力支撑，有助于推动农村能源的绿色化和智能化进程。

当前，我国农村农业生产会产生大量废弃物，如秸秆、林业边角料和畜禽粪便等。若能得到妥善处理，则其具有极大的开发潜力。秸秆和林木废弃物可以通过热解或气化技术转化为富含氢气和一氧化碳的裂解气，畜禽粪便及农产品加工废弃物则通过厌氧发酵产生主要含甲烷、二氧化碳和氨气的沼气，这些气体均可作为 SOFCs 优质的燃料。SOFCs 的高温运行特性使其能够直接利用沼气和裂解气，稳定发电并释放热能和二氧化碳，支持农业温室系统的运行。多余电能可满足农村生活和生产需求，结合余热回收技术，有效提升能源利用效率，缓解冬季供暖压力等。

3.1 SOFCs 冷热电三联供系统应用于家庭能源供应

尽管目前 SOFCs 在我国的应用仍处于起步阶段，且农村经济基础相对薄弱，推广面临一定挑战，但 SOFCs 系统凭借高度模块化设计，具备灵活适应多样负载条件的能力。其占地面积小、建设周期短的优势，使其非常适合农村 15 kW 功率等级的家庭固定式小型热电联产系统（micro

combined heat and power,MCHP)的推广应用。在以往的研究中,SOFCs 多依赖接入现有的天然气管网,以天然气作为燃料实现高效热电联供,这在一定程度上降低了远距离输电损耗,并能持续提供采暖和生活热水,提升燃料利用效率(见图 4)[44]。随着农业生物质资源的开发,利用丰富生物质气的 SOFCs 系统也逐渐成为绿色低碳、能源高效的农村分布式能源和农业转型重要选择。

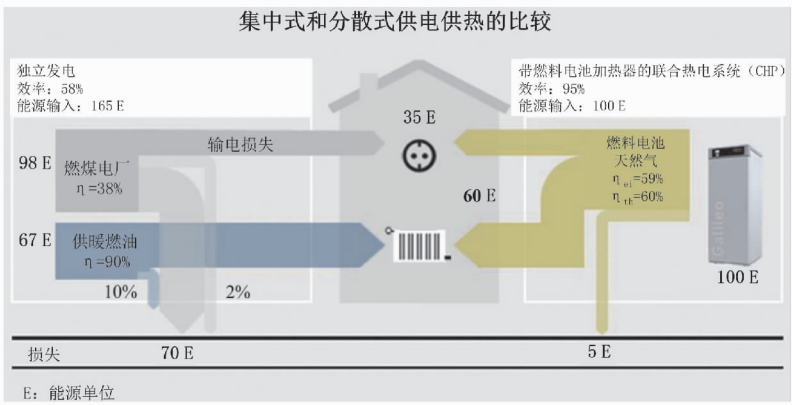


图 4　集中供能和分布式热电联供一次能源消耗比较(据文献[44]修改)

Fig. 4　Comparison of primary energy consumption of centralized energy supply and distributed combined heat and power generation

崔志恒等[45]提出并设计了一种生物质气化耦合 SOFCs 的冷热电联供系统。该系统以顶部布置的生物质气化单元(biomass gasification,BIOG)与 SOFC－燃气轮机(gas turbine,GT)联合系统为核心,辅以余热利用子系统,包括有机朗肯循环(organic rankine cycle,ORC)、双效溴化锂吸收式制冷装置(absorption refrigeration system,ARS)和生活热水供应模块(domestic hot water,DHW)。其整体运行机制如图 5 所示。空气和水经压缩处理后,分别作为气化剂进入换热器预热,再送入气化器与生物质及水蒸气反应生成合成气。该合成气经净化后与来自阳极的尾气混合,进入重整器,经过甲烷蒸汽重整和水煤气变换反应,提升氢气含量;同时,阳极尾气可调节入口温度与湿度,从而有效抑制积碳形成。另一部分压缩并预热后的空气流入 SOFCs 阴极,与阳极输入的提质合成气在燃料电池内发生电化学反应,产生的直流电经逆变处理后输出交流电。反应未完全的尾气进入燃烧室燃烧,释放的热能驱动燃气轮机进一步发电,并同时为气化剂和阴极空气提供预热。随后,ORC 系统回收高温烟气余热驱动有机工质进行发电;ARS 单元利用 ORC 排热实现吸收式制冷,所释放的热量由冷却塔带走;DHW 子系统则通过热交换器回收低温烟气热能,用于加热自来水并供给生活热水。基于农村丰富的农业生物质资源,利用生物质气作为燃料的 SOFCs 冷热电联供系统,凭借其高度模块化设计和对多种燃料的适应性,不仅实现了能源的高效转换和低碳排放,还能够灵活满足农村分布式能源的多样化需求,为农业废弃物的清洁利用和农村能源转型提供了切实可行的技术路径。

3.2　SOFCs 冷热电三联供系统应用于农业大棚

SOFCs 除了可以高效输出上述已提及的热能和电力等,还能有效释放二氧化碳气肥,满足设施农业对环境调控的多重需求[46]。蒋三平教授团队进行了 SOFCs 在连栋温棚用能、种苗植物工厂中可行性分析,他们认为 SOFCs 技术可以应用于智能连栋温室等现代农业工程领域,提供持续、稳定的电力供应,同时利用余热进行供热或制冷(见图 6)[47]。此外,该团队还通过建模分析与实地调研证实,SOFCs 系统具备较高的能效表现,能够实现稳定的电力输出。同时,其反应过程伴随生成水蒸气、二氧化碳及热量,结合智能化的排放控制技术,可精准调节温室内的湿度、CO_2 浓度和温度条件。该系统在满足多重环境调控需求的基础上,具有良好的应用潜力,适用于无土栽培、高日照作物种植及优质种苗育种等对环境参数要求较高的农业场景。

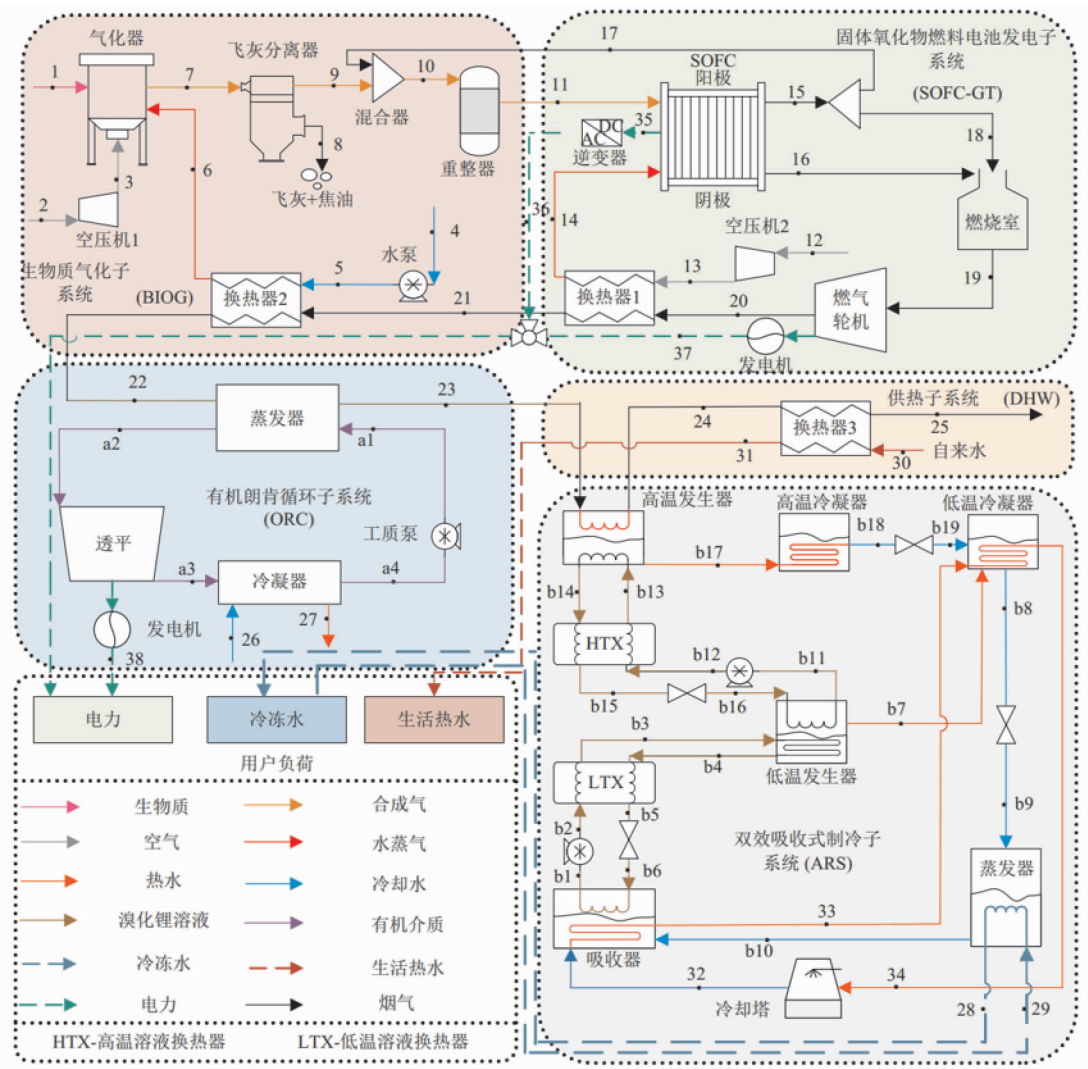


图 5 生物质气化耦合 SOFCs 的冷热电系统的能流图(据文献[45]修改)

Fig. 5 Energy flow diagram of cold and hot power system of biomass gasification coupled SOFCs

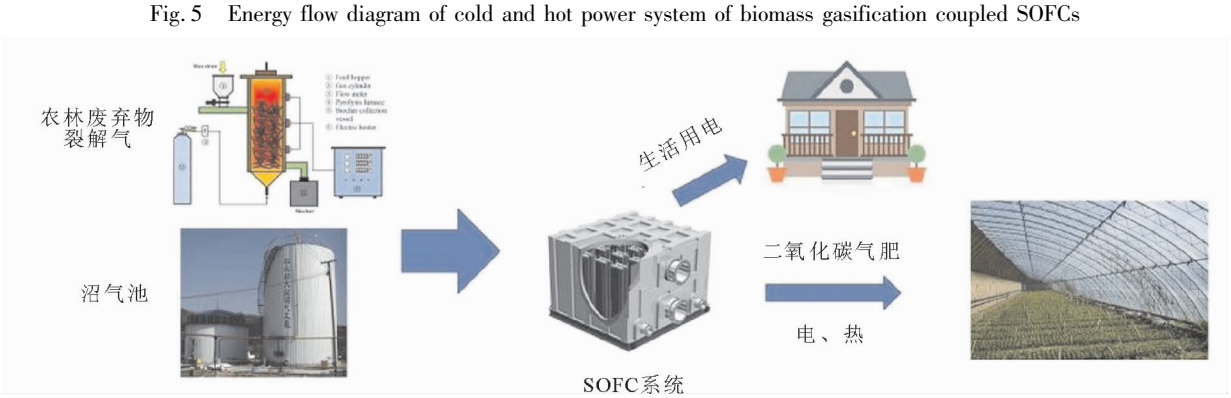


图 6 农村 SOFCs 系统应用(据文献[47]修改)

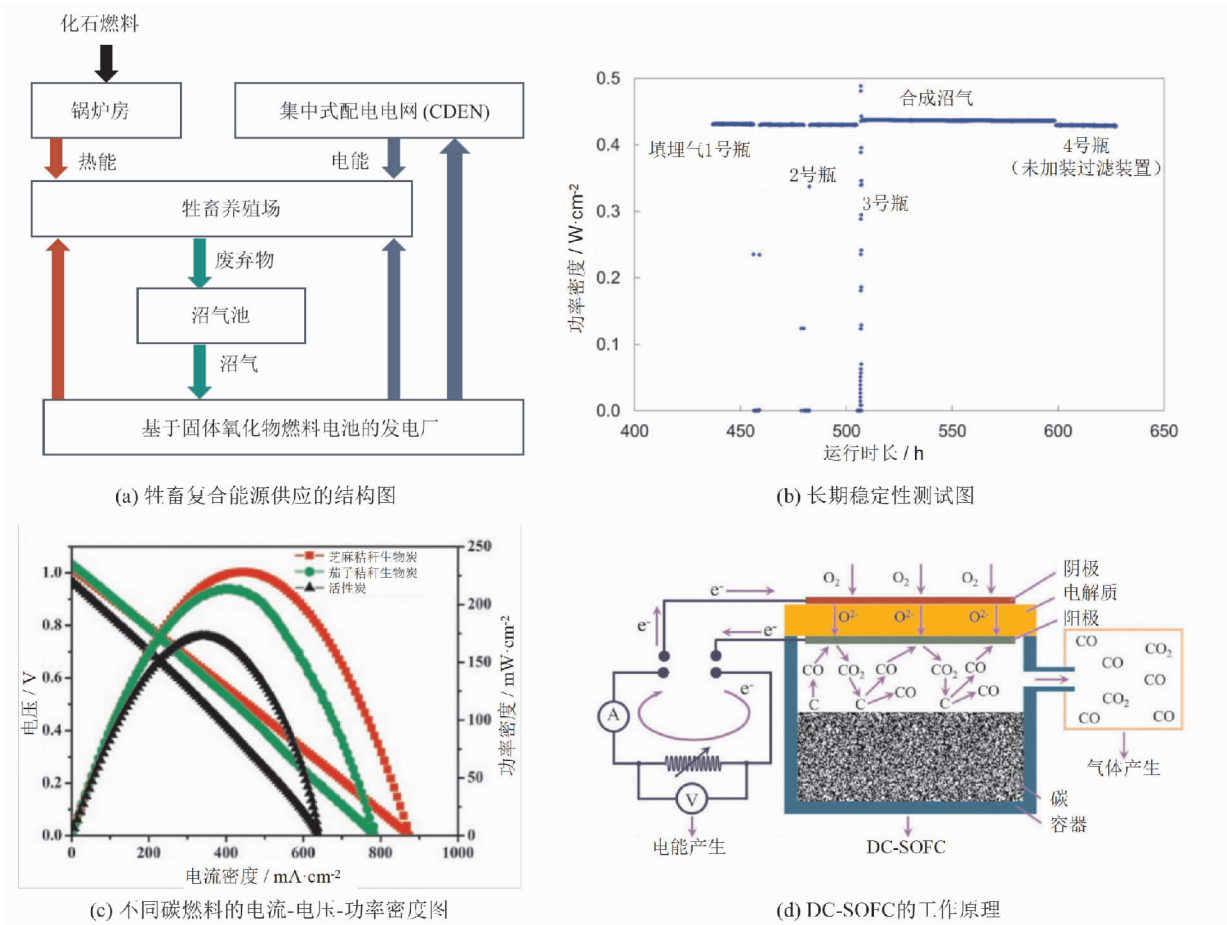
Fig. 6 Application of rural SOFCs system

3.3 SOFCs 冷热电三联供系统应用于新型农场

在农村家庭能源供应和农业大棚等场景中,SOFCs 已展现出优异的冷热电联供与环境调控能力,而在新型农场体系中,其基于生物质气的高效能源转化与综合利用潜力同样值得关注。Sosnina 等以一个拥有 2 000 头牲畜的奶牛场为研究对象,其每日可产生 3 024 m^3 沼气,足以支持 SOFC 系统的运行。通过优化算法,研究确定了 SOFC 的最佳容量范围为 100 kW 到 525 kW,这一范围内的 SOFCs 系统能够有效满足农场的电力和热

能需求。此外,通过将 SOFCs 产生的多余电力出售给电网,以及利用其热能替代传统锅炉供暖,农场的能源供应总成本得以进一步降低〔见图 7(a)〕[48]。这些数据表明,SOFCs 在农业领域的应用不仅能够实现能源自给自足,还能在经济上具有显著优势,为农村地区提供了一种可持续且高效的能源解决方案。Torija 等分析了 SOFCs 利用沼气进行热电联产的巨大潜力,发现与 SOFCs 结合几乎可以消除有害污染物排放,并减少使用电网电力和天然气的 CO_2 排放,且在最适合的情况下具有合理的避免碳成本[49]。Hagen 等通过 SOFCs 技术,利用干法重整等方法,处理来自于农作物残留物和有机废物的沼气,实现了高效的电力生产,如图 7(b)所示,尤其是在处理含有硫化合物的真实沼气时的性能和耐久性有良好的表现[50]。

除了将农村生物质转换为生物气用于 SOFCs 之外,固体有机质也可以通过一定的条件直接应用于 SOFC 发电中。例如,Miao 等通过将农作物秸秆(芝麻秸秆和茄子秸秆)转化为生物炭,并将其作为直接碳固体氧化物燃料电池(direct carbon solid oxide fuel cells, DC-SOFCs)的燃料〔见图 7(d)〕[51]。生物炭因其具备多孔结构、高比表面积及无序碳结构等优点,可以有效加速逆布多反应,使得农作物秸秆衍生的生物炭在提高 DC-SOFCs 的稳定性和效率方面发挥了重要作用。如图 7(c)所示,芝麻秸秆生物炭在 850 ℃时实现了最高的功率输出(228 m · W · cm^{-2}),并且展现出长达 30.7 h 的运行周期和最高 34.4% 的燃料利用率。将直接碳固体氧化物燃料电池接入冷热电三联供系统中,不仅减少了外部重整所耗费的能源,还实现了农村固体废弃物的高效资源化利用,兼具污染减排与能源回收的双重效益。



(a) 牲畜复合能源供应的结构图　(b) 长期稳定性测试图

(c) 不同碳燃料的电流-电压-功率密度图　(d) DC-SOFC的工作原理

图 7　SOFCs 三联供系统应用于新型农场(据文献[48,50-51]修改)

Fig. 7　SOFCs triple supply system applied in new farms

3.4 风光耦合固体氧化物电池(solid oxide cells,SOCs)综合储能系统

除生物质能源外,我国农村地区还拥有丰富的可再生能源资源,特别是风能和太阳能,具备较大的开发潜力与应用前景。面向农村及边远地区建设的多能互补发电系统,作为分布式发电与储能协同的一种模式,主要用于缓解生态破坏、可再生能源出力不稳定以及并网受限等因素造成的弃电问题。此类系统通常以太阳能和风能为主要能源基础,尤其适用于资源丰富但基础电力设施薄弱的偏远农村地区,可通过多能协同提升本地能源的开发效率。然而,由于风光资源具有明显的间歇性与波动性,其日内及年内出力变化较大,特别是以太阳能为主的系统易受气象条件影响,从而影响运行的稳定性与供能的可靠性,在一定程度上限制了其在偏远农村作为基础电力能源的广泛应用[52]。

基于此,Huang 团队提出了一种基于参数自适应随机模型预测控制(parameter adaptive stochastic model predictive control,PAS-MPC)的优化策略,用于解决风能太阳能氢能(wind-solar-hydrogen,WSH)耦合系统在源侧和负荷侧的不确定性问题(见图 8)[53]。该方法通过场景生成与缩减技术构建经典场景集,并结合滚动优化框架动态调整预测与控制时域。实验结果表明,与传统模型预测控制(model predictive control,MPC)和固定参数随机模型预测控制(stochastic model predictive control,SMPC)相比,PAS-MPC 显著提升了系统功率平衡能力(较 MPC 提高 63.55%,较 SMPC 提升 6.25%),有效降低了电解槽、燃料电池等关键设备的高功率运行频率,延长了设备生命周期。在极端工况下,系统仍能维持稳定运行,且计算效率较 SMPC 提升 36.84%。该策略为高比例可再生能源系统的鲁棒控制提供了新思路。

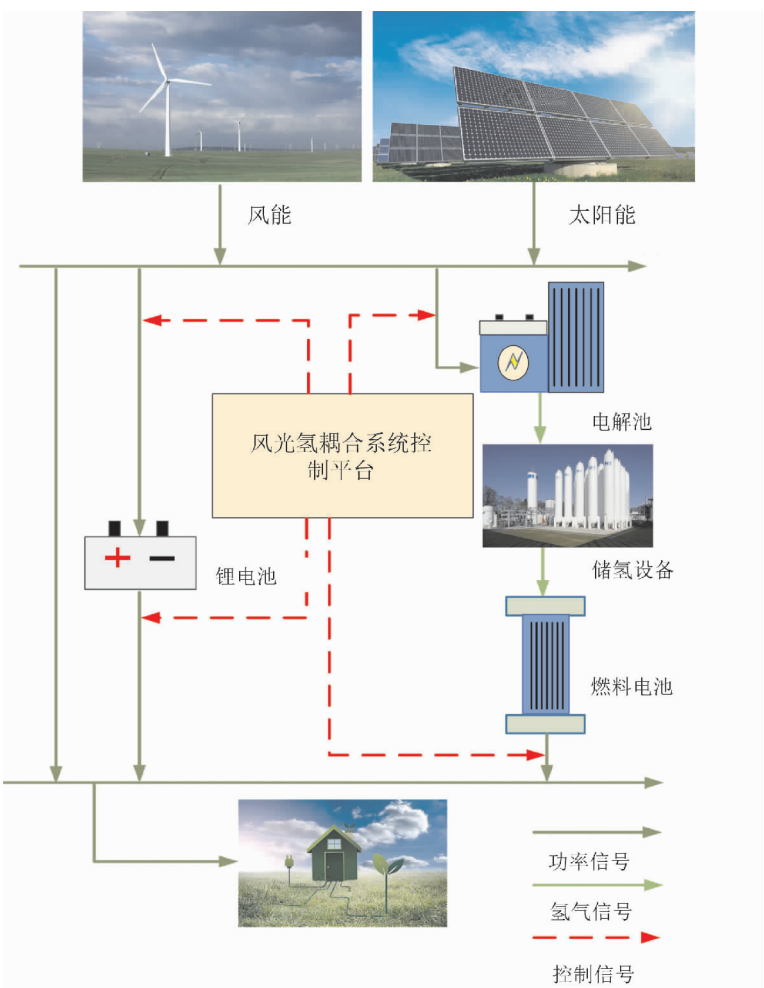


图 8 风光氢综合能源利用系统(据文献[53]修改)

Fig. 8 Wind, solar and hydrogen integrated energy system

这种风能太阳能耦合 SOCs 系统,利用风能和光伏发电驱动其运行。当风电和光伏出力超过即时负荷需求时,多余电力通过电解槽和电池有效收集并储存;若风电和光伏出力不足以满足需求,系统会自动调用燃料电池和电池补充能源需求。这种自适应方法不仅提升了供电质量,还最大化了风能和太阳能的利用,从而推动低碳能源实践的更广泛应用。

综上所述,SOFCs 可以利用农村地区的农业废弃物和生物质作为燃料,实现能源的可持续利用。同时,它还可以为农业生产提供热能,促进农业的发展。因此,其在新农村建设中的应用潜力显著,有望助力在农业农村领域实现碳达峰与碳中和目标,推动农村能源结构的绿色转型,促进可持续发展战略的实施。

3.5　农村地区 SOFCs 应用的挑战与机遇

SOFCs 的稳定性与可靠性是其在农村应用的关键。其运行温度通常需达 600 ℃以上,长期运行易出现电极老化、电解质劣化等问题,导致发电效率和寿命下降。同时 SOFCs 的运行依赖稳定的燃料供应,而农村能源受季节性与不稳定性影响较大,因此短期内在我国农村的推广存在挑战。然而,SOFCs 在农村的应用应视为循序渐进的过程,需要国家层面政策支持与技术研发协同推进,以提升系统可靠性与成熟度。在国外,例如日本通过能源农场(Ene-Farm)项目推动家庭分布式热电联供商业化,欧洲则聚焦微型热电联供,均依托政策扶持、产业链完善和市场培育实现了初步落地,这为我国农村地区的推广提供了有益借鉴。

因此,依托我国农村地区丰富且可再生的生物质气资源,SOFCs 技术在农村能源体系中具备显著的应用优势与发展潜力。但其推广仍需分阶段推进,通过借鉴国外成功经验,结合国内实际条件,加强技术创新与政策扶持,方可推动 SOFCs 在农村的广泛应用,为农村能源转型与可持续发展提供有力支撑。

4　结语

推动农村地区能源系统的绿色转型,不仅关系到农村居民生活水平的持续改善,也是构建现代能源格局的应有之义。该过程在推进乡村振兴战略、稳固脱贫成果、以及实现农业农村领域碳达峰与碳中和目标方面,具有重要的现实与长远价值。SOFCs 作为一种高效率、高稳定性的发电技术,可直接利用农业废弃物资源来实现新型能源化,为与当前时期中国农村现状和发展规划相匹配的低碳/近零碳社区综合能源系统提供一种媒介。

本文详细探讨了 SOFCs 在我国新农村建设中能源体系的应用,明确了研究旨在探索 SOFCs 技术在农业能源转型中和促进低碳经济发展的实际应用价值和意义,为解决“三农”问题和推动城乡融合提供创新的解决方案。SOFCs 凭借其高效且清洁的能量转化特性,能够有效利用农村地区丰富的农业废弃物,将其转化为可再利用的能源,从而显著提升农村能源的自给能力与利用效率。在减少环境污染的同时,该技术为农村能源可持续发展提供了切实可行的路径,兼顾了经济效益与生态保护的双重目标。SOFCs 的推广不仅有助于实现农村能源结构的优化,还通过推动技术进步与相关产业链发展,带动区域经济增长,提升农民生活质量,并助力农村迈向绿色低碳发展模式。

在解决“三农”问题方面,SOFCs 技术的应用有望改善农民的生活质量。通过提供清洁、可靠的能源供应,SOFCs 技术有助于缩小城乡之间的能源服务差距,推动城乡一体化进程。此外,SOFCs 技术的推广和应用还能够带动农村地区的相关产业链发展,促进农村经济的增长,从而在经济和社会层面上促进城乡融合,为实现全面乡村振兴和城乡协调发展做出贡献。

尽管 SOFCs 在我国农村地区的推广仍面临基础设施配套不足、初期投入成本较高等制约,但其在推动农村能源绿色低碳转型中具有重要的战略价值。本文的分析表明,SOFCs 能够与农村生物质气、沼气等可再生能源实现就地耦合与高效转化,为优化农村能源结构、改善生态环境和推动能源基础设施一体化建设提供有力的技术支撑。在新质生产力加快发展的背景下,通过持续推进电极材料优化、电堆结构设计和系统集成,SOFCs 有望进一步提升农村综合能源利用效率与清洁能源供给能力。随着乡村振兴战略、“双碳”目标以及“十五五”期间清洁低碳、安全高效新型能源体系建设的深入推进,加之关键材料制备、电堆集成和系统控制等技术的不断成熟,SOFCs 在农村能源体系中的应用潜力将进一步释放,为乡村全面振兴和农业农村现代化提供坚实的绿色能源技术保障。

参考文献

[1] 中共中央, 国务院. 中共中央 国务院关于锚定农业农村现代化扎实推进乡村全面振兴的意见[EB/OL]. (2026-02-03)[2026-07-10]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202602/content_7056929.htm.

[2] 求是网. 扎实推进乡村全面振兴[EB/OL]. (2025-03-03)[2026-07-10]. http://www.qstheory.cn/20250303/9d79971b90c84421843c79ce9026b894/c.html.

[3] 杨光. 发展农村生物质能源燃料产业创建新农村绿色生态宜居环境[J]. 新农业, 2023(23): 89-90.

[4] 雷小苗, 何继江, 杨守斌, 等. 能源转型视域下"零碳乡村"的可行性和环保性:以陕西关中 C 县 F 村为例[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2020, 22(5): 32-41.
Lei X M, He J J, Yang S B, et al. Feasibility and environmental protection of "Zero Carbon Rural" from the perspective of energy transition: Take F village in middle area of Shaanxi province as an example[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2020, 22(5): 32-41.

[5] 言艾,李明贤. 基于农户消费行为的低碳型社会主义新农村建设研究[J]. 中国林业经济, 2011(4): 45-48.
Yan A, Li M X. The research of low-carbon socialist new rural construction based on farmers' consumer behavior[J]. China Forestry Economy, 2011(4): 45-48.

[6] 魏康伟, 晏琳瑶, 郭志国, 等. 甲烷基固体氧化物燃料电池阳极的催化重整研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(10): 3338-3348.
Wei K W, Yan L T, Guo Z G, et al. Research progress on catalytic reforming of anodes for methane-based solid oxide fuel cells[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(10): 3338-3348.

[7] Li Y Y, Ding J X, Sun H B, et al. Performance analysis of the Inverted Brayton Cycle in the atmospheric solid oxide fuel cell hybrid power system[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 316: 118828.

[8] Corigliano O, Pagnotta L, Fragiacomo P. On the technology of solid oxide fuel cell (SOFC) energy systems for stationary power generation: A review[J]. Sustainability, 2022, 14(22): 15276.

[9] Cheng J H, Lavery R, Mccallum C S, et al. Crossflow flat solid oxide fuel cell (SOFC) semi-empirical modeling and the multi-fuel property based on a commercial 700 W stack[J]. Fuel, 2024, 358: 130172.

[10] 渠沛然. 乡村能源转型:从"要我转"到"我要转"[N/OL]. 中国能源报, 2025-06-02(09). https://www.cnenergynews.cn/article/4O9HWnv0dtO.

[11] 张胜杰. 挖掘农村能源潜力引领绿色低碳发展[N/OL]. 中国能源报, 2025-05-05(10). https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202505/05/content_30072207.html.

[12] Alaedini A H, Tourani H K, Saidi M. A review of waste-to-hydrogen conversion technologies for solid oxide fuel cell (SOFC) applications: Aspect of gasification process and catalyst development[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 329: 117077.

[13] Sarruf B J M, Hong J E, Steinberger-Wilckens R, et al. Ceria-Co-Cu-based SOFC anode for direct utilisation of methane or ethanol as fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(8): 5297-5308.

[14] Ma S A, Dong C Q, Hu X Y, et al. Techno-economic evaluation of a combined biomass gasification-solid oxide fuel cell system for ethanol production via syngas fermentation[J]. Fuel, 2022, 324: 124395.

[15] Wiranarongkorn K, Patcharavorachot Y, Panpranot J, et al. Hydrogen and power generation via integrated bio-oil sorption-enhanced steam reforming and solid oxide fuel cell systems: Economic feasibility analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(20): 11482-11493.

[16] Din Z U, Zainal Z A. Biomass integrated gasification-SOFC systems: Technology overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1356-1376.

[17] Jiang S P. Activation, microstructure, and polarization of solid oxide fuel cell cathodes[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2007, 11(1): 93-102.

[18] Ye H Q, Wang Y H, Ye Q R, et al. An advanced bifunctional single-element-incorporated ternary perovskite cathode for next-generation fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2025, 628: 235875.

[19] Dai H L, Boulfrad S, Chu X R, et al. $La_{0.5-x}Sc_xSr_{0.5}MnO_{3-\delta}$ cathodes for proton-conducting solid oxide fuel cells: Taking advantage of the secondary phase[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2024, 13(11): 1759-1770.

[20] Kumar R V, Khandale A P. A review on recent progress and selection of cobalt-based cathode materials for low temperature-solid oxide fuel cells[J]. Renew-

able and Sustainable Energy Reviews, 2022, 156: 111985.

[21] Dong X C, Yu S F, Gu Y Y, et al. Tailoring $SrFeO_3$ cathode with Ta and F allows high performance for proton-conducting solid oxide fuel cells [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2024, 41: e01104.

[22] Carollo G, Garbujo A, Mauvy F, et al. Critical raw material-free catalysts and electrocatalysts: Complementary strategies to activate economic, robust, and ecofriendly $SrTiO_3$ [J]. Energy & Fuels, 2020, 34 (9): 11438-11448.

[23] Liu K C, Hou Z Y, Li Q, et al. Overdoping-induced CeO_2-modified PBCF heterostructures for enhanced proton-conducting SOFCs[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 127: 896-902.

[24] Zhang Y, Shen L Y, Wang Y H, et al. Enhanced oxygen reduction kinetics of IT-SOFC cathode with $PrBaCo_2O_{5+\delta}/Gd_{0.1}Ce_{1.9}O_{2-\delta}$ coherent interface[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(7): 3495-3505.

[25] Yuan X Q, Chen H L, Tian W J, et al. Utilization of low-concentration coal-bed gas to generate power using a core-shell catalyst-modified solid oxide fuel cell[J]. Renewable Energy, 2020, 147(P1): 602-609.

[26] Yang Y, Chen Y H, Tian D, et al. A new A-site excessive strategy to improve performance of layered perovskite cathode for intermediate-temperature solid oxide fuel cells[J]. Electrochimica Acta, 2017, 231: 686-693.

[27] Pang S L, Xu J, Su Y J, et al. The role of A-site cation size mismatch in tune the catalytic activity and durability of double perovskite oxides[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2020, 270: 118868.

[28] Lee T H, Park K Y, Kim N I, et al. Robust $NdBa_{0.5}Sr_{0.5}Co_{1.5}Fe_{0.5}O_{5+\delta}$ cathode material and its degradation prevention operating logic for intermediate temperature-solid oxide fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2016, 331: 495-506.

[29] Hu T, Xu Y S, Xu K, et al. Visiting the roles of Sr-or Ca-doping on the oxygen reduction reaction activity and stability of a perovskite cathode for proton conducting solid oxide fuel cells[J]. SusMat, 2023, 3(1): 91-101.

[30] Rahumi O, Rath M K, Meshi L, et al. Ni-doped SFM double-perovskite electrocatalyst for high-performance symmetrical direct-ammonia-fed solid oxide fuel cells [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16 (40): 53652-53664.

[31] Xu C M, Sun K N, Yang X X, et al. Highly active and CO_2-tolerant $Sr_2Fe_{1.3}Ga_{0.2}Mo_{0.5}O_{6-\delta}$ cathode for intermediate-temperature solid oxide fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2020, 450: 227722.

[32] Teketel B S, Beshiwork B A, Tian D, et al. Promoted performance of layered perovskite $PrBaFe_2O_{5+\delta}$ cathode for protonic ceramic fuel cells by Zn doping[J]. Catalysts, 2022, 12(5): 488.

[33] Yang S J, Wen Y B, Zhang J C, et al. Electrochemical performance and stability of cobalt-free $Ln_{1.2}Sr_{0.8}NiO_4$ (Ln = La and Pr) air electrodes for proton-conducting reversible solid oxide cells[J]. Electrochimica Acta, 2018, 267: 269-277.

[34] Carneiro J S A, Brocca R A, Lucena M L R S, et al. Optimizing cathode materials for intermediate-temperature solid oxide fuel cells (SOFCs): Oxygen reduction on nanostructured lanthanum nickelate oxides[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, 200: 106-113.

[35] Ivanova M, Ricote S, Meulenberg W A, et al. Effects of A-and B-site (co-) acceptor doping on the structure and proton conductivity of $LaNbO_4$ [J]. Solid State Ionics, 2012, 213: 45-52.

[36] 陈思庚. IT-SOFC 钴基钙钛矿阴极材料的制备与性能研究[D]. 锦州:渤海大学, 2023: 4-7.

[37] Xi X G, Chen X H, Hou G H, et al. Fabrication and evaluation of $Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_{3-\delta}$ impregnated $PrBaCo_2O_{5+\delta}$ composite cathode for proton conducting SOFCs [J]. Ceramics International, 2014, 40 (8): 13753-13756.

[38] Chen S G, Zhang H X, Yao C A, et al. Review of SOFC cathode performance enhancement by surface modifications: Recent advances and future directions [J]. Energy & Fuels, 2023, 37(5): 3470-3487.

[39] Recalde M, Woudstra T, Aravind P V. Renewed sanitation technology: A highly efficient faecal-sludge gasification-solid oxide fuel cell power plant[J]. Applied Energy, 2018, 222: 515-529.

[40] 韦童. 基于 CH_4-CO_2 燃料的固体氧化物燃料电池阳极重整层研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2020: 3-5.

[41] Stoeckl B, Subotić V, Reichholf D, et al. Extensive analysis of large planar SOFC: Operation with humidified methane and carbon monoxide to examine carbon deposition based degradation[J]. Electrochimica Acta, 2017, 256: 325-336.

[42] Baldinelli A, Barelli L, Bidini G, et al. SOFC direct fuelling with high-methane gases: Optimal strategies

for fuel dilution and upgrade to avoid quick degradation [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 124: 492-503.

[43] Klein J M, Hénault M, Roux C, et al. Direct methane solid oxide fuel cell working by gradual internal steam reforming: Analysis of operation[J]. Journal of power sources, 2009, 193(1): 331-337.

[44] Mcphail S J, Kiviaho J, Conti B. The yellow pages of SOFC technology. International Status of SOFC deployment 2017[M/OL]// VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, 2017. https://api. semanticscholar. org/CorpusID:113725105.

[45] 崔志恒, 王江江, 霍硕杰, 等. 生物质气化耦合固体氧化物燃料电池的冷热电联供系统的性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9192-9204.
Cui Z H, Wang J J, Huo S J, et al. Performance analysis of a CCHP system coupled with biomass gasification and solid oxide fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9192-9204.

[46] 付学谦, 周亚中, 孙宏斌, 等. 园区农业能源互联网:概念、特征与应用价值[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 152-161.
Fu X Q, Zhou Y Z, Sun H B, et al. Park-level agricultural energy internet: Concept, characteristic and application value[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(12): 152-161.

[47] 蒋三平, 程一兵, 陈锦芳, 等. 现代设施农业新能源高温固体氧化物燃料电池发展展望[J]. 农业工程, 2023, 13(11): 46-53.
Jiang S P, Cheng Y B, Chen J F, et al. Prospects of high temperature solid oxide fuel cells as renewable energy solutions to modern facility agriculture[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(11): 46-53.

[48] Sosnina E N, Shalukho A V, Veselov L E. Application of SOFC for power supply of remote agricultural enterprises [C]// 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia: IEEE, 2020: 1-6.

[49] Torija S, Castillo-Castillo A, Brandon N P. The prospects for biogas integration with fuel cells in the United Kingdom[J]. Fuel Cells, 2016, 16(1): 55-79.

[50] Hagen A, Winiwarter A, Langnickl H, et al. SOFC operation with real biogas[J]. Fuel Cells, 2017, 17(6): 854-861.

[51] Miao K, Han T T, Wu Y X, et al. Highly efficient utilization of crop straw-derived biochars in direct carbon solid oxide fuel cells for electricity generation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 61: 39-46.

[52] 刘岚. 农村"光/蓄/燃"多能互补发电监控系统设计与实现[D]. 杭州:浙江农林大学, 2019: 2-5.

[53] Huang Y, Li S J, Zhang P, et al. Parameter adaptive stochastic model predictive control for wind-solar-hydrogen coupled power system[J]. Renewable Energy, 2024, 237: 121355.

(编 辑 邵 煜)

作者简介



李致朋,北京师范大学物理系本科,新加坡国立大学材料科学与工程博士,国家级领军人才,现任西北工业大学柔性电子学院教授,博士生导师,双碳科学与新能源技术中心主任。入选中国科协评审专家库,兼任中国建材工业经济研究会陶瓷新能源材料分会秘书长、第三届陕西省侨联青年委员会副会长。曾先后在新加坡科技研究局材料研究与工程研究院、日本国立材料研究所、美国国家标准与技术研究院开展科研工作,荣获澳大利亚国家奖学金,多次赴昆士兰大学访学,受聘为东京工业大学客座科学家,后任职于美国硅谷高端制造领域,担任世界 500 强企业首席工程师,项目负责人,积累了从基础科研、技术研发、工程生产到产业化落地的全链条经验。长期致力于新能源燃料电池研发与工业化应用研究,现已发表高水平国际期刊论文 100 余篇,编撰专业著作及行业综述 10 余部(篇),在国际学术会议作特邀报告 30 余次,担任 30 余种国际学术期刊审稿人,获批国内外授权专利 50 余项。