

面向电氢耦合能源系统的可逆固体氧化物电池研究进展

周峻^{1,2}, 孙跃跃^{1,2}, 李儒欢^{1,2}, 冀承泽^{1,2}, 付磊^{1,2}, 吴锴^{1,2}, 成永红^{1,2}

(1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 710049, 西安;
2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 可逆固体氧化物电池(RSOC)是一种能够灵活、高效地实现电能与燃料气化学能双向转换的关键技术,在可再生能源整合和能源存储领域具有巨大潜力,被视为构建电氢耦合能源系统的关键。西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室研究团队长期聚焦于 RSOC 电氢耦合技术,开展了一系列贯穿材料、电堆与系统层面的系统性研究。在材料层面,针对钙钛矿电极材料发展了原位出溶、煅烧工程、表面缺陷工程等创新设计方法,结合实验与计算探究了快速电荷转移、缺陷降低出溶势垒等电化学性能提升机制,实验结果表明,可逆固体氧化物单电池的电转氢效率超过 90%;在电堆层面,探究了模式切换过程中反应物比例、温度、压强等因素对 RSOC 动态性能的影响机理,改善反应物分布、引入模糊控制器等优化措施将电流超调抑制 99%以上,有效减轻模式切换动态过程的功率波动并提升长期运行稳定性;在系统层面,整合电能、热能、化学能等多重能源,构建了以 RSOC 为核心的电氢耦合能源系统,使用分段线性化方法优化 RSOC 的输入输出模型显著降低了计算复杂度,引入 RSOC 的热备用与停机状态使系统运行成本降低 24%。未来,该技术有望在可再生能源消纳、电网调峰、储能等领域得到广泛应用,推动构建清洁低碳、安全高效的能源体系。

关键词: 可逆固体氧化物电池;电极材料;钙钛矿材料;模式切换;电氢耦合

中图分类号: TM911.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202604006 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0072-12

Progress of Reversible Solid Oxide Cells for the Electric-Hydrogen Energy Systems

ZHOU Jun^{1,2}, SUN Yueyue^{1,2}, LI Ruhuan^{1,2}, JI Chengze^{1,2}, FU Lei^{1,2},
WU Kai^{1,2}, CHENG Yonghong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Reversible solid oxide cells (RSOC) represent a key technology capable of flexibly and efficiently achieving the bidirectional conversion between electrical energy and the chemical energy of fuel gases. They show great potential in renewable energy integration and energy storage, and are regarded as critical components for building electric-hydrogen coupled energy systems. The research team from the state key laboratory of electrical insulation and power equipment at Xi'an

Jiaotong University has long been focused on RSOC electric-hydrogen coupling technology, conducting a series of systematic investigations spanning materials, stacks, and systems. At the material level, innovative design methods for perovskite electrode materials have been developed, including in-situ exsolution, entropy engineering, and surface defect engineering. Combined with experimental and computational studies, mechanisms for enhancing electrochemical performance—such as rapid charge transfer and lowered exsolution barriers via defect engineering—have been elucidated. Experimental results show that the electricity-to-hydrogen conversion efficiency of reversible solid oxide single cells exceeds 90%. At the stack level, the influence mechanisms of factors including reactant ratio, temperature, and pressure on the dynamic performance of RSOC during mode switching have been explored. Optimization measures such as improved reactant distribution and the introduction of fuzzy controllers have been implemented, suppressing current overshoot by over 99% and effectively mitigating power fluctuations during the dynamic mode-switching process, thereby enhancing long-term operational stability. At the system level, multiple energy forms including electrical, thermal, and chemical energy have been integrated to construct RSOC-centered electric-hydrogen coupled energy systems. The input-output model of RSOC has been optimized using a piece-wise linearization method, significantly reducing computational complexity. The introduction of hot-standby and shutdown states for RSOC has lowered system operating costs by 24%. In the future, RSOC technology is expected to be widely applied in areas such as renewable energy accommodation, grid peaking, and energy storage, promoting the construction of a clean, low-carbon, safe, and efficient energy system.

Keywords: reversible solid oxide cells; electrode materials; perovskite material; mode switching; electric-hydrogen coupling

在“双碳”目标推进中,氢能因零碳排放特性成为可再生能源消纳与跨季节储能的关键载体^[1],但其规模化应用高度依赖高效、低成本的电氢转换技术。当前电解制氢设备存在效率偏低、动态响应差等问题,而燃料电池发电与储能的协同性也亟待提升,在此形势下,寻找高效、清洁的能源转换与存储技术成为当务之急。可逆固体氧化物电池(RSOC)作为一种新型的能源转换装置,不仅能够在燃料电池模式下将化学能高效转化为电能,而且还能在电解模式下充分利用可再生能源产生的电能,并将其转化为化学能存储或利用^[2]。RSOC 凭借其在电-氢双向转换方面的高效性,在可再生能源整合和能源存储领域展现出巨大潜力,被视为构建电氢耦合能源系统的核心技术之一^[3]。

从单电池这一最小构成单元的层面来看,RSOC 的性能突破高度依赖材料创新与成型工艺技术的成熟度^[4]。当前主流 RSOC 在电解质、燃料电极、氧电极三大核心组件上仍面临关键材料瓶颈。其中,电解质材料的研究主要聚焦于结构创新和工艺优化,如维持稳定性的同时推动减薄技术的发展,以实现性能的均衡提升。在电极材料方面,传统燃

料电极 NiO 因具备高电子电导、低成本及优异的催化活性而被广泛应用,然而,还原后的 Ni 金属易出现颗粒团聚、积碳和硫毒化的问题,导致电池在氧化还原循环和长期运行中性能不稳定^[5]。钙钛矿氧化物由于具有优异的热力学与机械稳定性,以及与主流电解质材料良好的物理相容性,已成为固体氧化物电池电极材料领域的研究热点并获得广泛应用^[6]。但是,目前钙钛矿基电极材料催化活性和稳定性仍存在不足,相关研究重点涵盖材料成分、微观结构和制备工艺等多个维度,并通过高熵设计、微纳级复合、表面出溶、多孔结构调控等创新策略,实现进一步性能优化^[7-8]。

在电池的动态运行中,尽管已有一些研究报道了该过程中多种物理参数的超调现象,但其双向模式切换下电流超调机理及对电池性能的影响迄今仍不清楚。现有研究更常聚焦于单一模式运行过程中的超调现象^[9-11]。为揭示 RSOC 在双向模式切换下电流超调的产生机制,国内外学者已开展了一定的探索性研究。文献[12]模拟 RSOC 的模式切换动态响应,发现电流和气体浓度在暂态过程均出现超调。而在电堆集成层面,密封技术需解决高温下气

体泄漏问题,单电池一致性控制需优化制备工艺以降低性能差异,热管理系统则需匹配 RSOC 双模式运行的动态热需求,进一步制约了 RSOC 从实验室小功率原型向大功率工程化应用的跨越^[13-14]。

RSOC 的系统集成需求与低碳导向形成了显著的协同推进效应^[15-16]。随着“风光储氢”一体化项目的增多,RSOC 系统可以实现与光伏、风电、储氢设备的深度耦合,解决多能源协同调度、动态工况适应性等系统级问题^[17-18],但很多现行的研究工作基于简单的 RSOC 模型,仅包含 RSOC 的固定输入输出效率建模。文献[19]将 RSOC 引入以混合热电联产(CHP)系统为主导的综合能源系统(IES)中,通过 RSOC 吸收可再生能源有效减少弃电量,大幅降低弃电成本,使得该模型的总成本较不含 RSOC 和碳捕捉技术的模型降低 31.26%。文献[20]将鲁棒可行域引入基于 RSOC 的电氢耦合虚拟电厂中,采用二阶的 RSOC 输入输出效率模型,考虑了两种 RSOC 的工作状态和氢储能。相比之下,团队提出的 RSOC 模型不仅采用分段线性化效率模型以精准表征不同负荷下的能效特性,还构建了多状态转换模型以适配电解、发电、待机复杂运行模式,同时融入电堆热管理与低碳运行方式,可更全面支撑电氢耦合能源系统的协同优化需求。

西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室长期致力于新能源高效转换与存储技术的基础研究与工程化应用,尤其在 RSOC 技术的研究与开发上持续深耕,在材料、电堆、系统等多个层面取得了一系列具有国际影响力的重要成果。该文对团队创新研究进行系统且深入的综述,呈现 RSOC 技术的发展现状、面临的机遇与挑战,并对未来发展趋势进行展望,为相关领域的研究人员提供参考。

1 RSOC 关键材料体系的开发与研究

RSOC 核心单电池的基本构成为两个多孔电极和一个致密电解质。此外,一些特殊结构的电池还会增加功能层、阻挡层等,发挥促进催化、阻止不利反应等作用。这些材料均为陶瓷或金属材料,必须符合许多基本要求,即材料的本征传导特性、材料在不同气氛和温度条件下的化学稳定性和微观结构稳定性以及材料之间的化学和机械兼容性。目前 RSOC 的商业化应用仍然面临输出性能不足、工作温度过高、稳定性不足以及制造成本高昂等挑战,这些挑战很大程度上与电池材料的性能密切相关。

1.1 电解质材料

电解质是固体氧化物电池的核心组成部分之一,直接影响电池的工作温度和转换效率。电解质的主要作用是稳定传导离子、分隔燃料气与氧化剂及隔绝电子,因此,在满足基本要求的同时,足够高的离子电导率和足够低的电子电导率是其关键性能指标。

电解质材料的研究主要分为 2 个路径:材料本征性能的提升和成型工艺的优化。目前一些典型电解质材料,包括氧化钇稳定氧化锆(YSZ)、氧化钪稳定氧化锆(SSZ)、锶镁掺杂镱酸钡(LSGM)、锶镁钡掺杂镱酸钡(LSGMC)、钪掺杂氧化铈(GDC)、钪掺杂氧化铈(SDC)等氧离子导体电解质及钪掺杂铈酸钡基(BCY)质子导体电解质,由于优异、稳定的本征性能而被广泛使用^[21]。常见电解质的电导率最佳温度区间有一定区别,如图 1 所示^[22]。GDC 和 SSZ 分别在中低温和高温区域更具优势,而 LSGM 虽然电导率稍低,但其与钙钛矿电极材料在热膨胀上则更加匹配。

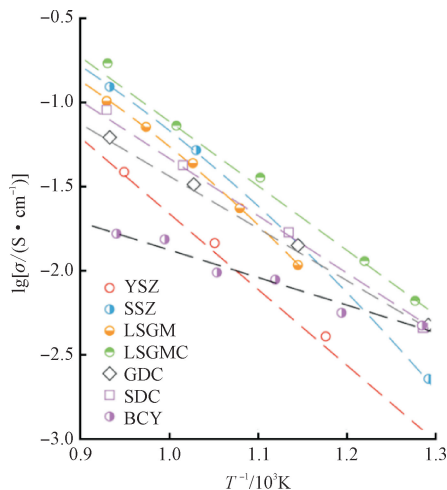


图 1 部分电解质材料的离子电导率^[22]

Fig. 1 Ionic conductivity of selected electrolyte materials^[22]

除了材料本征特性,电解质部件的性能也与工况和成型工艺相关。材料的离子电导率随着温度的升高而增加,且电化学过程中会被热激活,所以高的操作温度对电解质性能是有利的。电解质厚度和晶粒尺寸也是影响电池性能的主要因素。实验室研究了不同类型的典型电解质材料,从材料成型工艺切入,进行了系统优化。通过旋涂法将阻挡层 GDC 涂覆于 SSZ 电解质片两侧,以避免电极材料中 La 与 Sr 元素在高温条件下与电解质中 Zr 元素发生化学反应生成 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 与 Sr_2ZrO_4 高阻抗杂质相,从而损害电池性能^[23]。采用共压法、流延法、热压法

等多种成型方法,在造孔剂种类和含量、球磨工艺等方面对骨架进行了一系列优化,制备了不同结构的电池基体,如多孔|致密|多孔 LSGM 一体化基体,并制造出大尺寸单电池(10 cm×10 cm)用于电堆集成和性能研究。

1.2 燃料电池材料

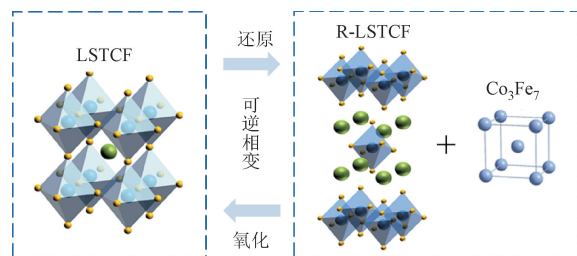
多孔电极作为 RSOC 反应的核心部件,其性能直接影响电池的整体效率和稳定性。因此,理想的电极材料必须具有以下特征:高电催化活性、足够高的离子电导率以及尽可能高的电子电导率及高孔隙率^[24]。电极的关键性能指标主要包括电催化活性、导电性、稳定性、抗积碳能力及抗硫中毒能力等。以氧离子传导型 RSOC 为例,燃料电池侧在固体氧化物燃料电池(SOFC)模式下发生氢氧化反应,而在固体氧化物电解池(SOEC)模式下发生析氢反应,这对电极的催化能力、不同气体吸附/解离能力等要求极高。

典型的燃料电池钙钛矿材料主要包括 LaCrO₃ 基、SrTiO₃ 基以及双钙钛矿材料等。实验室在 La_{0.75}Sr_{0.25}Cr_{0.5}Mn_{0.5}O₃ (LSCM)材料的基础上,通过 ABO₃ 型单钙钛矿 B 位 Ru 元素的微量掺杂,利用原位出溶与再氧化技术,合成了表面 Ru/RuO₂ 核壳结构修饰的 LSCM 燃料电池材料,表现出优异的可逆电化学性能和循环稳定性^[25]。

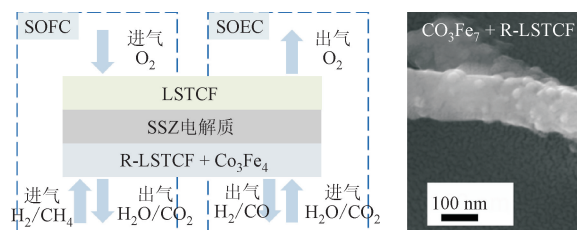
在一定程度范围的 A 位缺陷情况下,La 掺杂的 SrTiO₃ (LST)钙钛矿材料的离子电导率和热稳定性更加优异^[26]。实验室针对 A 位缺陷、B 位掺杂的 LST 钙钛矿材料进行了成分、结构、形貌等多种优化策略的深入研究。如图 2 所示,文献[27]开发了一种 La_{0.3}Sr_{0.6}Ti_{0.1}Co_{0.2}Fe_{0.7}O₃ (LSTCF)纤维电极材料,具有显著的电催化活性和耐用性。通过可逆相变过程重建了 LSTCF 纤维的表面形貌、结构及出溶 Co₃Fe₇ 合金纳米粒子的分布,在 RSOC 中展现出 60 小时的优异循环稳定性。具有高 CO₂ 吸附能力的 Co₃Fe₇ 合金纳米颗粒显著提升了还原后的 LSTCF(R-LSTCF)电极的电化学性能。文献[28]将 FeCoCuNi 中熔合金出溶的钛酸盐纤维结构材料作为高效燃料电池,出溶金属团簇显著降低了 CO₂ 还原反应的能垒,从而实现了优异的电化学性能。

A 位缺陷的程度强烈影响着纳米合金出溶过程,文献[23]展示了本团队开发的具有一系列 A 位缺陷的新型纤维 La_xSr_xTi_{0.9}Ni_{0.1}O₃ (LSTN_x)结构,探索了 A 位缺陷的设计极限。过度缺陷($x < 0.4$)会产生杂质相和过量的 Ni 出溶,而 LSTN_{0.4} 燃料

电极呈现适度的出溶和稳定的介孔纤维结构,在 LSTN_x 燃料电极的单电池中展现出最高的电化学性能。此外,实验室制备了镍掺杂的 LSTN_n ($n=5$ 、8 和 12)层状钙钛矿氧化物^[29]。XPS 分析表明,氧空位和出溶 Ni 纳米颗粒的协同效应赋予了 LSTN_n 燃料电极的高电化学活性。调整层状钙钛矿中 n 的层数可以成为原位出溶设计异相催化剂的新策略。

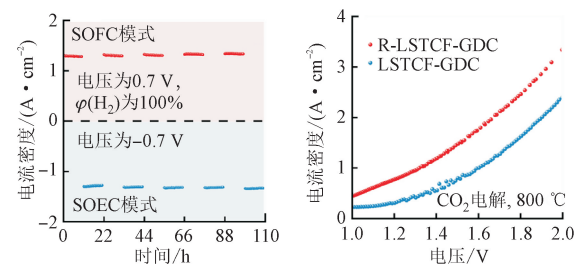


(a) 电极材料的晶体结构



(b) 电池运行示意图

(c) 电极形貌



(d) 电池的循环性能

(e) 电池的电解性能

图 2 应用于 RSOC 的可逆相变钙钛矿纤维电极^[27]

Fig. 2 Reversible phase transition of perovskite fiber electrodes for RSOC^[27]

AA'BB'O₆ 双钙钛矿材料是 ABO₃ 钙钛矿的一种变体,其中 A 位与 B 位可以掺杂多种不同的元素,从而在还原气氛下形成多种催化与功能性材料。A₂FeMoO₆ (A 代表 Ca、Sr、Ba) 是典型的适用于 RSOC 的燃料极材料,其中 Sr₂FeMoO₆ 表现出相对更高的热稳定性、电子电导与催化活性^[30]。基于酸刻蚀技术,实验室设计出一种适用于 RSOC 的多级催化结构的燃料电池 Sr₂Co_{0.4}Fe_{1.2}Mo_{0.4}O₆^[31]。酸刻蚀技术有效地选择性重建了钙钛矿表面,达到 A 位缺陷、B 位暴露和富氧空位的状态。这种重建策

略促进了离子传导和表面纳米颗粒出溶,从而加速了氢氧化反应和二氧化碳还原反应的动力学。通过酸刻蚀表面缺陷工程优化了燃料电池表面修饰的纳米颗粒,为 RSOC 电极提供了一种简单高效的性能提升策略。

1.3 氧电极材料

氧电极侧在两种模式下发生氧还原反应和析氧反应,对应 O_2 和 O^{2-} 之间的逆向反应。因此,氧电极材料需要满足高导电性、高催化活性、高稳定性及与其他部件的兼容性。钙钛矿材料是目前应用和研究最常用的氧电极材料,其中 $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 等传统电子导体与 YSZ 电解质热匹配优异,但离子电导率低,导致反应仅限于氧电极、电解质和空气三相界面区域^[22]。开发混合离子-电子导体氧电极,将反应位点从三相界面拓展至整个氧电极区域至关重要。文献[32]基于常用氧电极 $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_3$ (LSCF),合成了高熵钙钛矿 $La_{0.6}Sr_{0.4}Cu_{0.2}Fe_{0.2}Ti_{0.2}Mn_{0.2}Ni_{0.2}O_3$ (LSCuFTMN),增加的氧空位有助于提高气体分子的吸附和解离。电化学阻抗测试和弛豫时间分布结果表明,B 位高熵的设计降低了极化阻抗,促进了中频范围内的传质和电荷转移,将电解电流密度提升了 50%,表明该高熵氧化物是高效稳定的 RSOC 氧电极的潜在材料。

独特的微观结构对电极的电化学性能起着重要作用。传统颗粒材料在高温烧结后容易结块,导致孔隙率低、极化电阻高^[33]。文献[34]通过改进的静电纺丝方法制备了核壳结构氧电极 $YCo_{0.5}Fe_{0.5}O_3$ -GDC(YCF-GDC),具有高孔隙率、大量三相界面反应位点、快速传质和高效电荷转移的特性,明显提高了氧电极催化活性和稳定性。GDC 纳米粒子的引入通过增加额外的氧离子途径加速了物质传输和电荷转移过程。具有 YCF-GDC 氧电极的电池发电功率是 YCF 纤维氧电极的 1.6 倍,展现出核壳结构复合电极的优势与前景。

2 RSOC 运行机理与优化控制的研究

RSOC 作为兼具高效发电与高温电解能力的新型能量转换装置,因其在电-氢一体化能源系统中的应用前景而受到广泛关注。然而,RSOC 的双向运行及模式切换过程伴随复杂的电化学-热-流体多物理场耦合现象,尤其是在瞬态快速模式切换过程表现出显著的不稳定动态响应和电流超调现象,对电堆的输出性能与长期工作稳定性提出了挑战。近年来,国内外学者围绕电极结构建模、运行特性、瞬态

过程机理、控制优化策略、电堆集成及测试等方面开展了系统研究,取得了一系列成果。

2.1 电极结构与反应机理建模

RSOC 的氧化还原反应发生在多孔电极的三相界面处^[35],其微观结构对电池的性能具有显著影响。格子玻尔兹曼方法(LBM)可用于基于多孔电极微结构的电化学与流体传输过程模拟^[36]。文献[37]运用 LBM 研究了共流平面 SOFC 的温度分布。现有 LBM 方面的研究多集中于燃料电池模式下多孔电极内部的反应与流动特性,而针对 RSOC 在燃料电池模式与电解模式转换过程中所涉及的动态传质规律仍然研究不足。因此文献[38]采用了三维重构与人工生成相结合的方法,结合二维 LBM 对 RSOC 燃料电池的传质过程和动态性能进行了研究。结果表明,与高斯滤波得到的结构和纤维棒结构相比,X 射线断层扫描法和随机球体法所得的有效扩散系数和电池性能更高,在工作模式切换过程中,从 SOFC 模式切换至 SOEC 模式时氢气浓度的变化幅度更大,这些结果为可逆固体氧化物电池多孔电极的设计与优化提供参考。

2.2 动态运行特性分析与控制优化

RSOC 的最显著特点为双向运行的能力,但是其动态响应较为复杂,因此更多的研究仍聚焦稳态特性分析与优化^[39]。文献[40]基于流程模拟方法对 RSOC 发电与电解模式进行了仿真研究,探讨了稳态条件下单电池内部微观参数的变化规律及两种运行模式下运行参数对电池性能的影响。

动态性能分析相比于 RSOC 稳态运行的研究更具挑战性,但对于提升 RSOC 的灵活运行的能力十分重要。尤其涉及到动态模式切换时,如图 3, V_{end} 表示切换目标电压,研究发现 RSOC 在模式切换过程中存在电流的大幅超调,这会损害 RSOC 的长期稳定性。文献[41]指出电流密度超调现象是由于气体扩散速度慢于电化学响应,且在由 SOEC 模式切换至 SOFC 模式时超调现象更为显著。而且,最近研究表明电流密度超调和响应时间由气体的扩散速率、气体浓度和温度决定,且较高的工作温度会导致更大的超调和更短的响应时间。以上述研究为基础,实验室进一步研究发现压强对瞬态最高电流密度影响不大,但对稳态电流密度有明显影响^[42]。另外,文献[43]对双向模式切换过程中的超调幅值提出了修正性结论,指出 SOFC 至 SOEC 与 SOEC 至 SOFC 切换的瞬态超调大小并无固定的孰大孰小关系,而是与反应物比例密切相关,可以通过控制

相近比例的 H_2O 与 H_2 保证双向切换较低的超调。文献[44]则指出,切换方向与电压变化趋势均会影响电压变化量与超调值之间的正相关关系,并从物质分布及过电位角度进行了机理性解释。

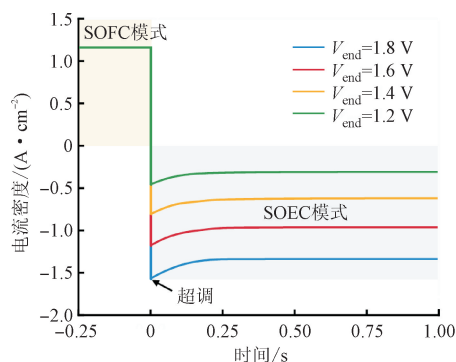


图3 模式切换引起电流密度超调^[41]

Fig. 3 Mode switching leads to current density overshoot^[41]

除模式切换超调机理的研究外,也有部分工作针对动态切换优化措施展开了探讨。文献[45]设计了一个比例积分控制器(PI 控制器),以确保在各种电流变化下 RSOC 模式的安全切换。如图 4 所示,实验室面向对模式切换电流超调直接有效的优化控制策略,提出了一种双向适应性模糊 PI 控制器,以实现在 RSOC 多种模式切换场景下的鲁棒控制,相比于固定切换时间,外加控制器实现了更优异的超调抑制效果^[46]。

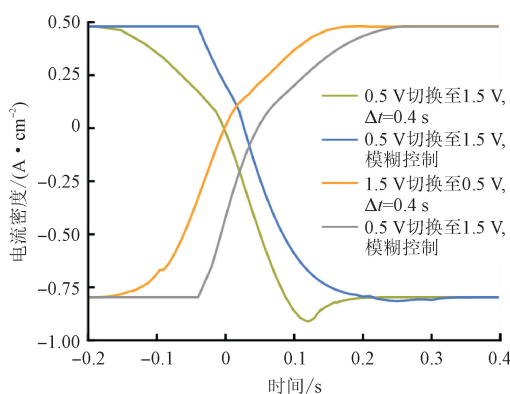


图4 模糊控制器的超调抑制效果^[46]

Fig. 4 Overshoot suppression effect of fuzzy controllers^[46]

此外,通过调节切换前后的气体流量可以改善整体反应物分布,从而加快再平衡过程,有效抑制超调。上述优化措施可以有效减轻 RSOC 模式切换动态过程的功率波动,从而提升其长期运行稳定性。

2.3 电堆集成与测试

RSOC 电堆集成可以参考 SOFC 或 SOEC 电堆

的集成思路,因为体系一致,但通气方面需要考虑多种反应物的供给路径。测试系统一般至少需要包含:电堆、供电系统、温控系统、气体供给装置、性能测试系统等^[47-49]。西安交通大学电工材料电气绝缘国家重点实验室完成了 RSOC 电堆关键装置的设计、制备与开发,如图 5 所示。在设计过程中,充分兼顾功率密度、效率、稳定性和成本等核心指标,采用模块化思路,将电堆划分为单电池模块、连接体模块、冷却模块及密封模块等单元结构,从而提升装置的组装便利性及后续维护和更换的灵活性。

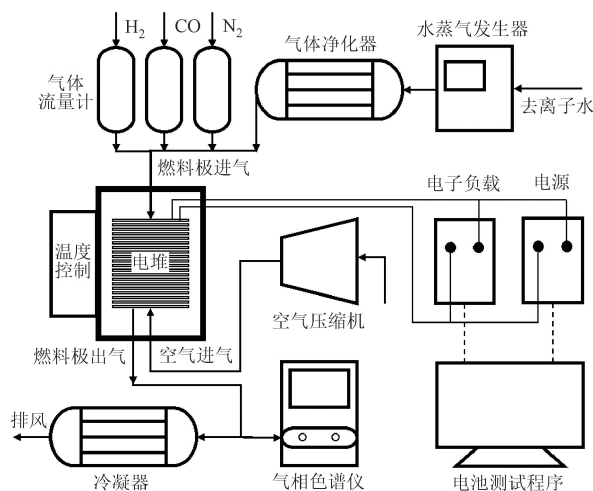


图5 RSOC 电堆测试系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of RSOC stack testing system

3 含 RSOC 的综合能源系统集成与优化研究

本节聚焦 RSOC 综合能源系统集成与优化的关键科学问题,围绕 RSOC 多尺度数学建模、电池多状态模式切换与热管理模型构建、风光储微电网耦合运行机制及碳约束下电氢耦合系统优化,梳理了相关研究内容,旨在为 RSOC 技术的性能提升、低碳贡献和后续技术迭代与应用提供支撑。

3.1 不同尺度的 RSOC 数学模型

在含 RSOC 的综合能源系统优化调度研究中,数学模型的构建需紧密结合具体调度场景的特点进行针对性设计,其建模精度直接影响优化结果的可靠性及计算效率。面向中长期系统规划时,模型通常侧重能量转换效率等宏观特性,通过合理简化以控制计算复杂度;而在短期实时调度场景中,则需要细化电化学反应动力学、热动态特性等微观机制,以提升仿真精度与调度指令的可行性。为系统梳理不同建模思路的特点与适用场景,本文根据现有研究

成果,在表 1 中归纳了含 RSOC 综合能源系统中具有代表性的建模方法,部分包含热回收的电堆运行辅助设备(BoP)系统,展示团队在该领域的研究积累与模型构建思路。

表 1 文献报道的 RSOC 仿真优化模型特征对比

Table 1 Comparison of characteristics of RSOC simulation optimization models reported in the literatures

文献	模型类型	状态切换数	热管理
[50]	固定效率线性模型	2	
[20]	二阶效率模型	2	
[51]	分段线性化模型	2	
[52]	分段线性化模型	4	
[53]	二阶效率模型	2	含热回收的 BoP 模型
[54]	分段线性化+ 平面拟合模型	4	含热回收的 BoP 模型

作为耦合电-氢双向转换设备,RSOC 的建模至少要包含:①电-氢双向转换的效率;②电解产气与燃料电池发电两个模式的状态切换。在含 RSOC 复杂综合系统优化模型中,基础 RSOC 输入输出运行功率转换定义如下

$$P_t^{\text{SOFC}} = E_t^{\text{SOFC}} \eta^{\text{SOFC}} \quad (1)$$

$$P_t^{\text{SOEC}} = \frac{E_t^{\text{SOEC}}}{\eta^{\text{SOEC}}} \quad (2)$$

式中: E_t^{SOFC} 和 E_t^{SOEC} 分别表示在 t 时刻 SOFC 模式运行消耗的燃料化学能和 SOEC 模式运行消耗的电能; η^{SOFC} 和 η^{SOEC} 分别表示 2 种模式运行的化学能与电能的双向转换效率。

关于电-氢双向转换,在同一时刻 RSOC 仅能在 SOFC 或 SOEC 一个模式下工作,因此常引入 0~1 的二进制变量用以约束 RSOC 的运行状态,表达式如下

$$U_t^{\text{SOFC}} + U_t^{\text{SOEC}} = 1 \quad (3)$$

$$0 \leq P_t^{\text{SOFC}} \leq P_{\max} U_t^{\text{SOFC}} \quad (4)$$

$$0 \leq P_t^{\text{SOEC}} \leq P_{\max} U_t^{\text{SOEC}} \quad (5)$$

式中: U_t^{SOFC} 和 U_t^{SOEC} 分别表示 RSOC 发电和电解运行状态的二进制变量; $P_{\max}$ 表示 RSOC 的装机容量。

实际工作中,RSOC 的效率并非固定值,而会随着输入输出的气体流量或电功率发生改变。本研究团队^[51]基于 RSOC 整合电力、纯氢、合成天然气及氢气-天然气混合气等多重能源,构建了新型电-氢能源系统。使用分段线性化方法建立了 RSOC 的输入输出模型,可显著降低优化问题的计算复杂度。

考虑输入输出曲线的 RSOC 模型可以使用不同的复杂曲线方程替代能源转换效率,替换的数学模型方程如下

$$P_t^{\text{SOFC}} = F_1(V_t^{\text{SOFC}}) \Delta H \quad (6)$$

$$V_t^{\text{SOEC}} = \frac{F_2(P_t^{\text{SOEC}})}{\Delta H} \quad (7)$$

式中: F_1 表示发电运行中不同进气量下燃料中化学能转化成电能的效率, ΔH 是氢气的热值,其值为 $33 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 F_2 表示电解运行中不同输入电功率下电能转化成氢能的效率。

在现如今求解器求解能力的限制下,非线性问题往往通过使用递增线性化分段的方法来简化计算。式(6)和式(7)中的 F_1 、 F_2 可以使用方程(8)~(10)的方法进行线性化处理,具体算法如下

$$f(x) = f(x_1) + \sum_{s=1}^{N-1} [f(x_{s+1}) - f(x_s)] \epsilon_s \quad (8)$$

$$x = x_1 + \sum_{s=1}^N (x_{s+1} - x_s) \epsilon_s \quad (9)$$

$$\epsilon_{s+1} \leq S, S \leq \epsilon_s, 0 \leq \epsilon_s \leq 1 \quad (10)$$

式中: ϵ_s 表示 s 段的状态信息,其取值范围为 $[0, 1]$; $f(x_s)$ 是 s 段的起点; S 是 0~1 变量,用于限制 ϵ_s 。

3.2 RSOC 的多状态与热管理模型

RSOC 的工作温度很高,主流文献报道的工作温度区间为 $800 \sim 1200 \text{ K}$,引入热备用状态能够显著减少 RSOC 的热损耗,增强 RSOC 的总体能量转换效率。考虑到多种运行状态的 RSOC 模型,实验室构建了包含 RSOC 的电气网络集成能源系统^[52],在所提算例对比中,考虑了热备用和停机状态的 RSOC 模型使系统运行成本降低 24%。考虑多运行状态的 RSOC 模型应替换式(3),表达式如下

$$U_t^{\text{gen}} + U_t^{\text{ele}} + U_t^{\text{sta}} + U_t^{\text{shu}} = 1 \quad (11)$$

式中: U_t^{gen} 、 U_t^{ele} 、 U_t^{sta} 、 U_t^{shu} 表示 RSOC 在时间 t 时的发电、电解、热备用和停机状态的二进制变量。

采用下式描述 RSOC 的状态切换动作,使之更符合 RSOC 的运行逻辑,表达式如下

$$U_t^{\text{sta}} + U_{t-1}^{\text{shu}} \leq 1 \quad (12)$$

$$\begin{cases} Y_{t-1}^{\text{ele}} = U_{t-1}^{\text{sta}} U_t^{\text{ele}} \\ Y_{t-1}^{\text{gen}} = U_{t-1}^{\text{sta}} U_t^{\text{gen}} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} Z_{t-1}^{\text{ele}} = U_{t-1}^{\text{shu}} U_t^{\text{ele}} \\ Z_{t-1}^{\text{gen}} = U_{t-1}^{\text{shu}} U_t^{\text{gen}} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} W_{t-1}^{\text{ele}} = U_{t-1}^{\text{ele}} (U_t^{\text{shu}} + U_t^{\text{sta}}) \\ W_{t-1}^{\text{gen}} = U_{t-1}^{\text{gen}} (U_t^{\text{shu}} + U_t^{\text{sta}}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: Y_t^{gen} 、 Y_t^{ele} 、 Z_t^{gen} 、 Z_t^{ele} 、 W_t^{gen} 、 W_t^{ele} 分别表示 RSOC 单元发电热启动、电解热启动、发电冷启动、

电解冷启动、发电停机和电解停机的状态切换二进制变量。

高温运行的 RSOC 在热电联产与热回收场景中具备显著优势,为此团队充分考虑 RSOC 的 BoP 系统,整合了 RSOC 的电化学特性、热管理机制及多状态转换规律,建立了完善的 RSOC 模型框架^[54]。图 6 展示了含热回收系统的 RSOC 电堆 BoP 系统模型图,该系统由电堆与电堆辅热系统构成,其中热回收系统可回收电堆排放废气中的热能,实现热能的二次利用,进一步提升系统能源综合利用率。

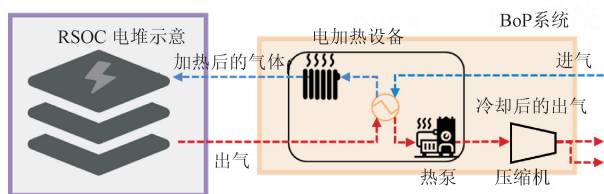


图 6 RSOC 电堆的 BoP 系统模型图^[54]

Fig. 6 BoP system model diagram of RSOC stack^[54]

3.3 不同场景下 RSOC 耦合风光储微电网优化运行框架

基于 RSOC 的综合能源系统在能源管理、负载均衡、调峰和季节性储能方面独具优势。RSOC 不仅在一台机组上集成了能够双向运行的设备,节约了大量空间系统规模,还适配多种碳质燃料,能与其他可再生能源等领域集成应用。并且,RSOC 双模式运行的功率、容量与时间可灵活定制,发电/电解的能量转换效率远高于传统能源转化设备,配合长期储能装置,可实现可再生能源的高效存储与利用。团队构建的典型 RSOC 综合能源系统如图 7 所示^[54]。

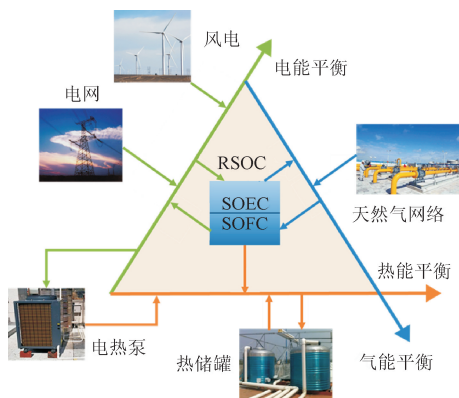


图 7 基于 RSOC 的电-气-热综合能源系统^[54]

Fig. 7 RSOC-based electricity-gas-heat integrated energy systems^[54]

在独立工业工厂中,RSOC 可深度耦合生产废料处理,利用可再生能源实现能源自给需求。实验室基于此建立了一个结合沼气厂的 RSOC 热-电-气综合能源系统模型^[55],比较了 CHP 和 RSOC 两种消耗沼气生产电力和热能方式的优劣,分析了电价波动对综合能源系统的投资成本和“弃风、弃光”的决策影响。通过建立综合能源系统协同运行模型,可以优化系统的运行策略,提高可再生能源的消纳率和系统的经济性。

在现有的碳交易市场下,以 RSOC 为核心的电氢耦合能源系统面临碳排放责任界定模糊、能碳协同调度不足、用能侧低碳潜力未充分释放等问题^[56]。碳排放权交易依托基准线法配额分配与动态交易机制,通过碳价波动与配额收益调节 RSOC 的投资规模与模式切换策略。绿证交易以绿电属性确权与收益叠加为核心,推动 RSOC 与储能系统的能碳耦合优化,助力提升可再生能源利用率。

团队在能碳耦合响应的优化运行建模方面,将绿证收益、碳收益纳入系统成本函数,构建 RSOC、储能系统的能碳耦合优化模型,精准刻画碳排放能在能源生产、传输、转换、消费全过程的时空转移规律,凸显 RSOC 在绿色、低碳层面的显著优势。实验室基于 RSOC 与 CHP 系统构建综合能源系统模型^[57],分析了多种低碳机制对系统的影响。双层优化通过调整电价影响 IES 调度,显著降低限电比例。通过对于碳交易机制的参数进行敏感性分析,探讨了碳交易机制对于系统成本和减碳措施的主动调控机制。

4 结 论

本文分别从关键材料开发、动态运行控制、系统集成优化等维度进行了深入研究,得出以下结论。

(1)通过实验分析与仿真模拟,团队开发出对称型 $\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.6}\text{Ti}_{0.1}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_3$ 纤维电极材料,实现了表面形貌/结构的动态重构与出溶 Co_3Fe_7 合金纳米粒子的分布优化,两种模式下分别达到 $0.98 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的发电功率密度和 $1.09 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的电解电流密度,并展现出优异的循环稳定性。

(2)建立多物理场耦合三维模型,得到了气体流动及电极内物质分布与过电压变化这两个影响超调的重要因素,引入模糊控制器后实现了多场景下模式切换过程中电压的动态调节,将电流超调抑制了 99% 以上,并有效减轻了功率波动,从而提高了 RSOC 的长期工作稳定性。

(3)构建 RSOC 为核心的电氢耦合能源系统,使用分段线性化方法显著降低了计算复杂度,考虑了热备用和停机状态的模型使系统运行成本降低 24%,并在综合能源系统优化中实现了单电池的动态参数(温度、电流密度、电压)跟踪。

5 展 望

在“双碳”目标的驱动下,随着可再生能源的大规模开发和利用,可逆固体氧化物电池作为电氢耦合能源系统的重要组成部分,在一体化双向转换、高效率与低能耗、快速灵活响应、全固态可靠结构等方面具有不可替代的优势。目前,RSOC 设备已在示范项目中试点运行,但在高稳定性与长耐久性材料的开发、电堆批量化生产、不同尺度能源系统的协同运行机制及市场认知度的提高等方面还面临较多挑战,尚难以大规模投入生产应用。

目前 RSOC 电极和电解质材料的电化学性能、稳定性等有待进一步提高,性能衰退机制尚不明确;电堆制造成本仍较高,规模化生产技术还不够成熟,大功率电堆的集成技术仍待发展,影响了 RSOC 技术的产业化进程;RSOC 与其他能源系统的协同运行机制还不够完善,不同尺度的优化计算中 RSOC 的精细建模仍存在计算量瓶颈,系统的经济性和可靠性有待进一步提升。

随着 RSOC 的能源转换效率和运行稳定性的不断提高,建设成本和运行成本的不断降低,RSOC 技术在可再生能源消纳、电网调峰、应急电源等领域的应用将更加广泛,为构建清洁低碳、安全高效的能源体系做出重要贡献。

参考文献:

- [1] RISCO-BRAVO A, VARELA C, BARTELS J, et al. From green hydrogen to electricity: a review on recent advances, challenges, and opportunities on power-to-hydrogen-to-power systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 189(Part A): 113930.
- [2] BANASIAK D, GALLAUN M, RINNHOFFER C, et al. Integration of a rSOC-system to industrial processes [J]. *Energy Conversion and Management*: X, 2023, 20: 100425.
- [3] VENKATARAMAN V, PÉREZ-FORTES M, WANG Li-gang, et al. Reversible solid oxide systems for energy and chemical applications-review & perspectives [J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 24: 100782.
- [4] KHAN M S, XU X, KNIBBE R, et al. Air electrodes and related degradation mechanisms in solid oxide electrolysis and reversible solid oxide cells [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 143: 110918.
- [5] HE Shuai, ZOU Yuanfeng, CHEN Kongfa, et al. A critical review of key materials and issues in solid oxide cells [J]. *Interdisciplinary Materials*, 2023, 2(1): 111-136.
- [6] ASSIREY E A R. Perovskite synthesis, properties and their related biochemical and industrial application [J]. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 2019, 27(6): 817-829.
- [7] LIU Zuoqing, TANG Zhengjie, SONG Yufei, et al. High-Entropy perovskite oxide: a new opportunity for developing highly active and durable air electrode for reversible protonic ceramic electrochemical cells [J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 217.
- [8] LI Yihang, LI Yanpu, ZHANG Shaowei, et al. Mutual conversion of CO-CO₂ on a perovskite fuel electrode with endogenous alloy nanoparticles for reversible solid oxide cells [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(7): 9138-9150.
- [9] KANG S, AHN K Y. Dynamic modeling of solid oxide fuel cell and engine hybrid system for distributed power generation [J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 1086-1099.
- [10] NERATM. Modeling and analysis of short-period transient response of a single, planar, anode supported, solid oxide fuel cell during load variations [J]. *Energy*, 2017, 138: 728-738.
- [11] MCVAY D, ZHAO Li, BROUWER J. Dynamic sub-thermoneutral voltage operation of solid oxide electrolysis with alternative heat addition [J]. *ECS Transactions*, 2017, 78(1): 2975-2985.
- [12] JIN Xinfang, XUE Xingjian. Mathematical modeling analysis of regenerative solid oxide fuel cells in switching mode conditions [J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(19): 6652-6658.
- [13] PREININGER M, SUBOTIC V, STOECKL B, et al. Electrochemical characterization of a CFY-stack with planar electrolyte-supported solid oxide cells in rSOC operation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(27): 12398-12412.
- [14] SAARINEN V, PENNANEN J, KOTISAARI M, et al. Design, manufacturing, and operation of movable 2 × 10 kW size rSOC system [J]. *Fuel Cells*, 2021, 21(5): 477-487.
- [15] BALDINELLI A, BARELLI L, BIDINI G. Sustainable water-energy innovations for higher comfort of living in remote and rural areas from developing coun-

- tries; from seawater to hydrogen through reversible solid oxide cells [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128846.
- [16] YANG Yiping, LEI Jinyong, HUANG Xurui, et al. Recent development in reversible solid oxide fuel cells: theory, integration and prospective [J]. *ChemElectroChem*, 2024, 11(6): e202300593.
- [17] CALIFANO M, SORRENTINO M, PIANESE C. Energy management control strategies addressing the rSOC degradation phenomena in a polygeneration microgrid [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 95: 1137-1150.
- [18] WANG Chen, LI Zheng, ZHU Meng, et al. Improving the performance and economics of reversible solid oxide cell-based hydrogen energy storage systems through the utilization of renewable alternative fuels [J]. *Fuel*, 2024, 375: 132484.
- [19] 李欣, 王昌胜, 李新宇, 等. 含可逆固体氧化物电池的综合能源系统低碳运行优化 [J]. *电力建设*, 2025, 46(1): 58-71.
- LI Xin, WANG Changsheng, LI Xinyu, et al. Low carbon operation optimization of integrated energy system with reversible solid oxide cell [J]. *Electric Power Construction*, 2025, 46(1): 58-71.
- [20] 王秋杰, 刘国安, 谭洪, 等. 考虑电氢耦合的虚拟电厂鲁棒可行域模型与求解 [J]. *电网技术*, 2025, 49(3): 889-898.
- WANG Qiujie, LIU Guoan, TAN Hong, et al. Models and solutions of robust feasible region for virtual power plants with electric hydrogen coupling [J]. *Power System Technology*, 2025, 49(3): 889-898.
- [21] SHI Huangang, SU Chao, RAN Ran, et al. Electrolyte materials for intermediate-temperature solid oxide fuel cells [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2020, 30(6): 764-774.
- [22] GÓMEZ S Y, HOTZA D. Current developments in reversible solid oxide fuel cells [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 61: 155-174.
- [23] YANG Jiaming, ZHOU Jun, LIU Zhengrong, et al. Exploring heterogeneous phases in highly A-site-deficient titanate with Ni exsolution [J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 580: 233369.
- [24] MOGENSEN M B. Materials for reversible solid oxide cells [J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2020, 21: 265-273.
- [25] WANG Junkai, ZHOU Jun, YANG Jiaming, et al. Tailoring the surface of perovskite through in situ growth of Ru/RuO₂ nanoparticles as robust symmetrical electrodes for reversible solid oxide cells [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7(23): 2000828.
- [26] LI Xue, ZHAO Hailei, ZHOU Xiong, et al. Electrical conductivity and structural stability of La-doped SrTiO₃ with A-site deficiency as anode materials for solid oxide fuel cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(15): 7913-7918.
- [27] YIN Chaofan, YANG Jiaming, FENG Jiangyuan, et al. Tailoring the reversible phase transition of perovskite nanofiber electrodes for high-performance and durable reversible solid oxide cells [J]. *Nano-Micro Letters*, 2025, 17(1): 150.
- [28] ZHOU Zilin, CUI Jiajia, LIU Zhengrong, et al. Exsolved medium-entropy alloy fecocuni in titanate fibers enables solid oxide cells with superb electrochemical performance [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, 13(10): 7563-7572.
- [29] LIU Zhengrong, JUN Zhou, SUN Yueyue, et al. Tuning exsolution of nanoparticles in defect engineered layered perovskite oxides for efficient CO₂ electrolysis [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2023, 84(9): 219-227.
- [30] FALCÓN H, BARBERO J A, ARAUJO G, et al. Double perovskite oxides A₂FeMoO_{6-δ} (A = Ca, Sr and Ba) as catalysts for methane combustion [J]. *Applied Catalysis: B Environmental*, 2004, 53(1): 37-45.
- [31] SUN Yueyue, ZHOU Jun, YANG Jiaming, et al. Nanosurface-reconstructed fuel electrode by selective etching for highly efficient and stable solid oxide cells [J]. *Advanced Science*, 2025, 12(4): 2409272.
- [32] LIU Zhengrong, ZHOU Zilin, YANG Jiaming, et al. Design of a B-site Co-free multielement perovskite oxide as oxygen electrode for efficient CO₂ solid oxide electrolysis cells [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2024, 7(23): 11020-11030.
- [33] LEE J G, PARK J H, SHUL Y G. Tailoring gadolinium-doped ceria-based solid oxide fuel cells to achieve 2 W · cm⁻² at 550 °C [J]. *Nature Communication*, 2014, 5(1): 4045.
- [34] YANG Jiaming, WANG Junkai, FU Lei, et al. Electrospun core-shell fibers for high-efficient composite cathode-based solid oxide fuel cells [J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(2): 1768-1778.
- [35] OUYANG Zhufeng, KOMATSU Y, SCIAZKO A, et al. Operando observations of active three phase boundary of patterned nickel-yttria stabilized zirconia electrode in solid oxide cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 529: 231228.

- [36] XU Han, DANG Zheng. Numerical investigation of coupled mass transport and electrochemical reactions in porous SOFC anode microstructure [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 109: 1252-1260.
- [37] YAHYA A, RABHI R, DHAHRI H, et al. Numerical simulation of temperature distribution in a planar solid oxide fuel cell using lattice Boltzmann method [J]. *Powder Technology*, 2018, 338: 402-415.
- [38] ZHAO Hongfei, ZHOU Jun, ZONG Zheng, et al. Three-dimensional reconstruction and optimization of porous fuel electrode in reversible solid oxide cells based on the Lattice Boltzmann method [J]. *Electrochimica Acta*, 2024, 476: 143702.
- [39] BAE Y, LEE S, YOON K J, et al. Three-dimensional dynamic modeling and transport analysis of solid oxide fuel cells under electrical load change [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 165: 405-418.
- [40] 赵鸿飞, 陈前昌, 宗正, 等. 可逆固体氧化物电池发电-电解条件下的运行特性分析 [J]. *电工电能新技术*, 2022, 41(3): 23-32.
- ZHAO Hongfei, CHEN Qianchang, ZONG Zheng, et al. Analysis of steady-state characteristics in reversible solid oxide cell [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(3): 23-32.
- [41] ZONG Zheng, ZHOU Jun, ZHANG Zihang, et al. Dynamic analysis of current overshoots in reversible solid oxide cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(70): 34896-34911.
- [42] 赵鸿飞, 周峻, 宗正, 等. 可逆固体氧化物电池模式切换时的动态特性分析 [J]. *可再生能源*, 2022, 40(12): 1577-1582.
- ZHAO Hongfei, ZHOU Jun, ZONG Zheng, et al. Dynamic characterization of reversible solid oxide cells during the mode-switching process [J]. *Renewable Energy Resources*, 2022, 40(12): 1577-1582.
- [43] JI Chengze, ZHOU Jun, WU Kai, et al. Research on current density overshoot of reversible solid oxide cell during mode switching [C]//2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 2706-2710.
- [44] 冀承泽, 宗正, 戈阳阳, 等. 可逆固体氧化物电池电-氢双向瞬态转换特性及电流超调机制 [J]. *高电压技术*, 2025, 51(5): 2200-2209.
- JI Chengze, ZONG Zheng, GE Yangyang, et al. Transient characteristics and current overshoot mechanism of reversible solid oxide cells during bidirectional mode switching between power generation and hydrogen production [J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(5): 2200-2209.
- [45] BOTTA G, ROMEO M, FERNANDES A, et al. Dynamic modeling of reversible solid oxide cell stack and control strategy development [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 185: 636-653.
- [46] JI Chengze, ZHOU Jun, SONG Xuhui, et al. Dynamic modeling and optimal control of switching modes in reversible solid oxide cells for integrated electric-hydrogen energy system [J]. *Applied Energy*, 2025, 397: 126270.
- [47] XING Xuetao, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Inter-module management within a large-capacity high-temperature power-to-hydrogen plant [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 35(3): 1432-1442.
- [48] TERA I, ZHANG Shengan, LIU Guilian. A conceptual hydrogen, heat and power polygeneration system based on biomass gasification, SOFC and waste heat recovery units: Energy, exergy, economic and emergy (4E) assessment [J]. *Energy*, 2024, 295: 131015.
- [49] 周峻, 冀承泽, 李儒欢, 等. 电解水制氢技术发展现状及其在新型电力系统中的应用进展 [J]. *高电压技术*, 2025, 51(5): 2096-2113.
- ZHOU Jun, JI Chengze, LI Ruhuan, et al. Recent development in the technology of water electrolysis and its applications to new power systems [J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(5): 2096-2113.
- [50] 李远征, 任潇, 葛磊蛟, 等. 基于可逆固体氧化物电池的电热耦合微电网全生命周期规划-运营研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(13): 5169-5184.
- LI Yuanzheng, REN Xiao, GE Leijiao, et al. Research for entire lifecycle planning-operation of electric-hydrogen coupled microgrid based on reversible solid oxide cell [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(13): 5169-5184.
- [51] ZHANG Zihang, ZHOU Jun, ZONG Zheng, et al. Development and modelling of a novel electricity-hydrogen energy system based on reversible solid oxide cells and power to gas technology [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(52): 28305-28315.
- [52] ZHANG Xuzheng, YU Haoyu, ZHAO Hongfei, et al. Optimal operation of RSOC integrated energy systems considering multi-state transitions [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2404(1): 012023.
- [53] 黄纓惠, 朱振山, 温步瀛, 等. 基于可逆固体氧化物电池的电热氢耦合孤岛微电网容量规划 [J/OL]. *电网技术*. (2025-05-28)[2025-08-16]. <https://doi.org/>

10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0054.

HUANG Yinghui, ZHU Zhenshan, WEN Buying, et al. Capacity planning of electric-thermal-hydrogen coupled island microgrid based on reversible solid oxide cell [J/OL]. Power System Technology. (2025-05-28)[2025-08-16]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0054>.

- [54] LI Ruhuan, ZHOU Jun, QIU Zitong, et al. Optimal model-based electrochemical characteristics and thermal management of reversible solid oxide cells [J]. Applied Energy, 2025, 395: 126204.

- [55] 李儒欢, 余浩宇, 张旭征, 等. 计及电价波动的可逆固体氧化物电池“发电-电解产气”综合能源系统建模分析 [J]. 全球能源互联网, 2023, 6(5): 447-458.

LI Ruhuan, YU Haoyu, ZHANG Xuzheng, et al. Modeling and analysis of “power generation-electrolysis

for gas production” integrated energy system of reversible solid oxide battery with electricity price fluctuation [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 447-458.

- [56] 张鹏, 张自航, 周峻, 等. 可逆固体氧化物电池在低碳能源系统中的应用前景与挑战 [J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 54-63.

ZHANG Peng, ZHANG Zihang, ZHOU Jun, et al. Application prospects and challenges of reversible solid oxide cells in the low-carbon energy system [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6): 54-63.

- [57] LI Ruhuan, ZHOU Jun, QIU Zitong, et al. Bi-level optimization of hybrid energy conversion system based on a multi-distinct low-carbon microgrid [J]. Renewable Energy, 2025, 239: 122095.

(编辑 刘杨 陶晴)

团队介绍:

西安交通大学电气工程学院、电工材料电气绝缘全国重点实验室新型储能与能量转换纳米材料研究中心建立于2012年,是西安交通大学批准成立的学科交叉研究中心,是一个面向未来能源和电力可持续发展的研究机构。团队负责人成永红教授、吴锴教授均为国家级人才计划获得者。团队获得教育部自然科学一等奖2项、教育部自然科学二等奖2项、国家技术发明三等奖1项、陕西省科技进步一等奖1项等。目前,中心研究方向包括材料仿真模拟、储能电池材料、新型二维传感材料及传感器、先进可逆燃料电池技术、极端与特殊环境下介电性能、新能源技术及综合能源系统等,取得了一系列研究成果。



团队负责人:成永红教授、吴锴教授



团队合影