

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514133

固体氧化物电堆温度-应力测量技术研究进展*

鲍羿夫¹, 李明举¹, 熊星宇², 钱相臣¹

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院 北京 102206; 2. 中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院 北京 100083)

摘要:面向我国碳达峰碳中和重大战略对清洁能源体系构建的迫切需求, 固体氧化物电池凭借高能量转换效率和双向可逆特性, 已成为绿氢制备及高效发电的关键技术。然而高温运行下强烈的热-力耦合效应会诱发局部焦耳热, 导致电堆温度场非线性畸变, 加速性能衰减。现有温度/应力多物理场耦合表征技术受限于传感材料高温失稳, 在空间分辨率与动态响应方面存在瓶颈, 难以实现电堆内部场的全域高精度感知。系统综述了固体氧化物电池温度与应力测量技术进展, 重点评估热电偶、光纤传感、红外热成像及高能射线成像的核心性能: 热电偶响应快、成本低, 但易发生高温热电漂移; 光纤传感抗干扰能力强, 可实现分布式测量, 但在极端环境下可靠性不足; 红外热成像可实现非接触表面温度监测, 但受发射率影响且无法探测内部温度; 高能射线成像在三维应力重构中分辨率高, 但设备依赖性强、测试周期长。针对上述瓶颈, 故提出多模态融合温度测量方案, 协同多种传感技术以提升空间分辨率与耐受性; 建立基于高能射线与数字图像相关的高温应变无损测量方法, 突破动态响应限制。该研究为电堆热管理优化与结构可靠性提升提供高精度测量支撑, 为构建安全、高效、低碳的现代能源体系提供高精度测量学支撑。

关键词: 固体氧化物电堆; 温度分布; 应力分布; 非侵入式测量技术

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Advance in temperature-stress measurement techniques for solid oxide cells

Bao Yifu¹, Li Mingju¹, Xiong Xingyu², Qian Xiangchen¹

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In pursuit of China's Carbon Peak and Carbon Neutrality goals, solid oxide cells have emerged as key technologies for green hydrogen production and efficient power generation, due to their superior energy conversion efficiency and reversible operation capability. However, severe thermomechanical coupling during high-temperature operation causes localized Joule heating, distorted thermal fields, and accelerated degradation. Current multiphysics characterization methods for temperature and stress are constrained by the instability of sensor materials at high temperatures, leading to inadequate spatial resolution and dynamic response for accurate internal monitoring. This review systematically summarizes recent advances in temperature and stress measurement techniques for SOCs, comparing four core methods: Thermocouples are cost-effective with fast response yet prone to thermal drift; optical fiber sensing enables distributed measurement with electromagnetic immunity but suffers from limited reliability under extreme conditions; infrared thermography offers non-contact surface temperature mapping yet depends on emissivity and cannot probe internal temperatures; high-energy radiography allows high-resolution 3D stress reconstruction but requires complex instrumentation and long testing times. To address these limitations, we propose a multimodal sensing strategy integrating multiple transducers to enhance spatial resolution and thermal resilience, along with a non-destructive strain measurement approach combining high-energy radiography with digital image correlation to overcome dynamic response constraints. This work provides precise metrological support for thermal management optimization and structural reliability in SOC stacks, facilitating the development of safe, efficient, and low-carbon energy systems.

Keywords: solid oxide cell; temperature distribution; stress distribution; non-invasive measurement technology

0 引言

在全球工业化进程加速推进与人口规模持续扩张的双重驱动下,以化石能源主导的能源消费结构导致温室气体与污染物排放量显著增加。推动全球能源体系向低碳化、可再生化转型已成为应对气候危机和实现人类文明可持续发展的关键路径。“碳达峰、碳中和”是我国重大战略决策,对构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提出了迫切要求。在此背景下,氢能凭借零碳、高效、绿色、来源丰富、应用广泛等核心优势,被定位为未来国家能源体系的关键组成部分和终端用能绿色低碳转型的重要载体。《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》^[1]对此进行了明确部署,并将高效、低成本制氢技术列为重点攻关方向。

固体氧化物电池(solid oxide cells, SOC)作为兼具高效发电与高效电解制氢能力的双向可逆能源转换技术,是实现氢能与电力系统深度耦合的关键枢纽^[2]。固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)模式下可实现化学能向电能的高效转换,一次发电效率可达50%~65%,热电联供效率可达90%以上,具备高效率及燃料灵活性^[3]。固体氧化物电解池(solid oxide electrolysis cell, SOEC)模式下逆向完成电能至化学能的稳定存储。这种能量形态的灵活互变机制,不仅为智能电网提供了动态调节手段,更通过电力/氢气的双向转换,有效平抑风电、光伏等可再生能源的间歇性波动,在能源供给侧与需求侧之间构建起高效协同的缓冲枢纽,展现出构建新型电力系统的技术潜力^[4]。

在发电端应用场景中,SOFC突破传统燃料电池技术限制,其全固态陶瓷结构兼具高温运行优势与燃料多样性特征^[5]。相较于聚合物电解质膜(polymer electrolysis membrane, PEM)燃料电池对氢气纯度与贵金属催化剂的强依赖性,SOFC燃料适应性强,不仅支持氢气,还能直接利用天然气等多种常见燃料,降低了对高纯度氢气的依赖,且无需贵金属催化剂,兼顾成本优势与长期运行的可靠性。这些技术特点使其在分布式电站升级和绿色能源转型中展现出独特优势,成为替代传统发电方式的理想选择。

在储能与制氢领域,电解水制氢凭借其零碳排放特性及对波动性可再生能源的动态适配特性,已确立为最具发展潜力的绿氢制备方案^[6]。常见的电解水制氢技术包括碱性电解(alkaline electrolysis, ALK)、质子交换膜电解、阴离子交换膜电解(anion exchange membrane, AEM)及固体氧化物电解^[7-8]。其中,ALK虽依托成熟产业链占据市场主导,但面临效率低、电流密度不足及液态电解质补给的运维繁琐等瓶颈;PEM凭借低能耗、高功率密度

及动态响应优势适配可再生能源波动,但受限于膜寿命短与贵金属催化剂成本高的问题;AEM仍处实验室阶段,因高导电性耐碱膜电极开发困难及贵金属依赖导致产业化难度大^[9-11]。相较于其他电解技术,SOEC具备独特技术优势,其高温运行特性虽对系统材料提出更高要求,但通过热能协同效应可显著降低电能需求,同时实现高效的能量转换并完全规避贵金属催化剂依赖,在工业高温余热耦合场景中具有显著应用价值,此外还可通过同步电解水蒸气与二氧化碳制备特定比例的合成气,为碳基燃料合成提供关键原料^[12]。

然而SOC在高温运行工况下面临诸多挑战,在典型工作温度区间(800℃及以上)下,电堆温度场呈现显著非均匀分布特征,考虑到金属连接体与陶瓷电解质等关键组件间的热膨胀系数(coefficient of thermal expansion, CTE)失配效应,堆体呈现显著的局部应力集中。当热应力超过材料的承受极限时,将引发部件塑性变形乃至结构失效^[13-14]。这不仅加速电堆性能衰退进程,更潜藏安全运行风险,成为制约其大规模工程应用和产业化推广的核心瓶颈。因此,精准表征SOC电堆在高温复杂工况下的温度场与应力场分布具有重要理论和实践意义,通过精确测量高温工况下的电堆温度梯度分布和应力梯度分布特征,可以为电堆的热管理设计、材料选型以及结构优化提供关键数据支撑,从而有效提升电堆热机械稳定性与长周期运行可靠性,对实现绿氢规模化制备目标及推动国家能源转型战略实施发挥关键支撑作用。

本文系统梳理了SOC高温工况下的测量方法,从原理基础、工况适应性和技术瓶颈3个维度切入,重点对热电接触式测温、光纤分布式传感及红外辐射热成像这3类典型方法进行对比分析。此外,结合高能射线成像及数字成像相关法在材料内部缺陷检测与应力场反演中展现的物理穿透特性,初步探讨了其作为应力测量方案的可行性验证思路。在此基础上,本文进一步探讨了多模态融合温度测量方案及高温应变无损测量方案,为探索发展具有全域感知能力的SOC温度/应力分布无损测量技术提供新的思路与技术参考。

1 SOC工作原理

基本的SOC单元采用典型的三层结构设计(如图1所示),其核心部分为致密的电解质层,在电解质层的两侧分别对称布置多孔的燃料电极和空气电极。

在实际工程中,SOC系统通常采用云母基密封材料或玻璃基密封材料作为主要密封介质,这些材料通过高温烧结工艺实现与电堆各组件的紧密结合,从而有效防止气体泄漏并维持电堆的气密性。此外,为了实现SOC系统的规模化应用,多个单体SOC需要通过金属连接体

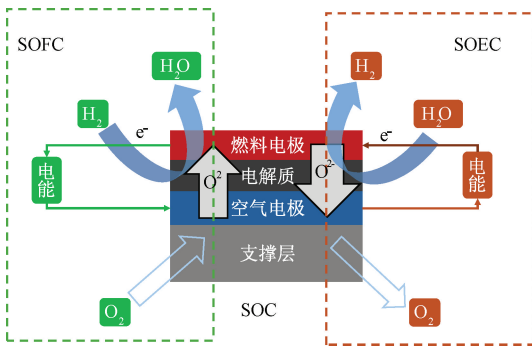


图 1 SOC 工作原理

Fig. 1 Diagram of SOC working principle

进行串联或并联组装,形成电堆结构^[15-16]。SOC 结构设计对内部温度梯度及热应力分布具有决定性影响,典型结构包括管式和平板式^[17-18]。管式结构由一端封闭、一端开口的管路构成,最内层是多孔支撑管,由里向外依次是阳极、电解质和阴极薄膜,燃料从管芯输入,空气通过管子外壁供给。平板式结构的几何形状简单,由阳极、电解质、阴极组成单电池,两边带槽的连接体连接相邻阴极和阳极,并在两侧提供气体通道,同时隔开两种气体。通常管式 SOC 电极间距大导致电流路径长、欧姆损耗高,局部焦耳热效应显著,易在电解质层形成径向温度梯度,诱发界面热应力集中,这成为制约其功率密度提升的关键因素。相比之下,平板式交错流 SOC(如图 2 所示)通过缩短极间距和优化流道设计显著改善热力学特性,交错流场通过强化气固传质减少浓差极化,同时借助对称分布的流道网络实现热场均衡,大大减小温度波动,有效降低因各向异性热膨胀系数差异引发的界面剪切应力^[19-20]。因此,当前主流研究聚焦于开发具有多孔隙电极与柔性密封结构的交错流 SOC。

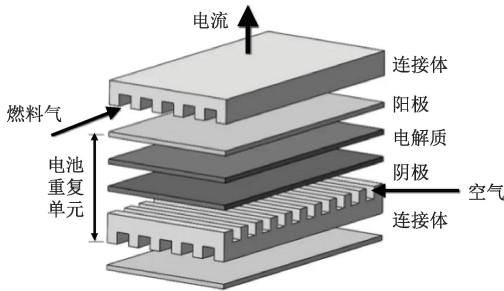


图 2 平板式交错流 SOC 结构

Fig. 2 Diagram of SOC structure of slab staggered flow

2 SOC 温度测量技术

由于电堆紧凑多层堆叠结构和严格的气密性要求,电堆温度分布的精准测量在实验层面上面临显著挑战。

为突破这一技术瓶颈,近年来数值模拟方法已成为该领域研究的重要手段。研究人员通过构建多物理场耦合模型,融合热力学基本定律、流体动力学控制方程、传热传质机理及电化学极化理论等基础理论体系,形成了具备多维度解析能力的仿真平台。借助有限元分析等先进数值计算方法,可精准模拟反应气体流动、电荷迁移过程、热对流与传导机制等多场耦合作用机理,进而实现电堆全局温度场的高效解析^[21-23]。

尽管已通过多物理场耦合仿真揭示了电堆的温度场分布特征,但现有数值模拟方法受限于本构方程的理想化假设,其部分边界条件与电堆实际运行工况存在显著偏差。相较而言,数据驱动模型虽无需物理场建模所需的几何简化与机理约束,但其温度预测性能本质上受限于训练数据集的质量与完备性,而目前支撑模型训练的温度数据多源自于有限测点的接触式测量。因此,开发针对电堆温度测量的高温测试技术,对指导 SOC 系统设计及故障检测等研究至关重要。

目前,SOFC 作为成熟的发电技术已进入商业化阶段,其热管理优化需求驱动了大量测温方法研究。而 SOEC 作为新兴电解制氢技术仍处于实验室验证阶段,尚未形成体系化测量需求。鉴于二者在热电耦合机制与高温运行工况的相似性,SOFC 成熟的测温方案可为 SOEC 提供重要技术参考。

2.1 热电偶与热电阻测温技术

热电偶测温技术基于塞贝克效应,通过两种不同金属组成的闭合回路测量温差热电动势以实现温度检测。如图 3 所示,热电偶具有响应速度快、测温范围宽及耐高温特性,适用于 SOC 内部瞬态温度变化及局部热点监测。该技术结构简单,可实现电堆多测点布置,为全面温度监控提供有效手段。通过分析不同工况下的温度分布特征,可为电堆热管理优化设计提供数据支持,从而降低温度异常导致的性能衰减风险^[24]。

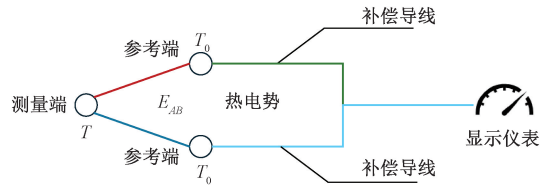


图 3 热电偶测温技术测量原理

Fig. 3 Thermocouple temperature measurement technology measurement principle

由于热电偶在 SOC 温度监测中同时具备接触式测量的高精度优势与热惯性迟滞的技术局限,某研究团队创新性地开发了多参数耦合监测系统。该系统集成气体计量加湿、多层密封壳体、多通道毛细管阵列和温度传感

模块,首次实现中温 SOFC 阳极表面气体成分与温度分布的同步监测。实验通过气相色谱和热电偶联用,揭示了电极表面甲烷重整反应的动态竞争机制及电流密度对温度场的调控规律^[25]。虽然基于多通道采样的设计获得了高分辨率的化学-热力学耦合数据,但存在毛细管阵列引起阳极流场的局部湍流扰动,热电偶固有的热惯性导致瞬态温度响应存在测量延迟等技术局限。

针对传统热电偶的动态响应瓶颈,后续研究开发的分段式 SOFC 通过集成多个独立电极段与嵌入式热电偶,实现了电化学性能与温度场的空间同步监测,其分区电极设计可解析不同氢气稀释比例及负载下的局部电流、阻抗及温度响应^[26]。图 4 为分段式 SOFC 测试系统示意图^[26]。然而该测试系统受限于电池封装工艺,导致热电偶部署密度不足,仍难以捕捉微区温度梯度动态变化;且分段结构可能引入额外接触电阻,传感器集成易扰动局部气流传导与热场分布,造成测量偏差,尤其在电流密度突变区域存在温度异常。

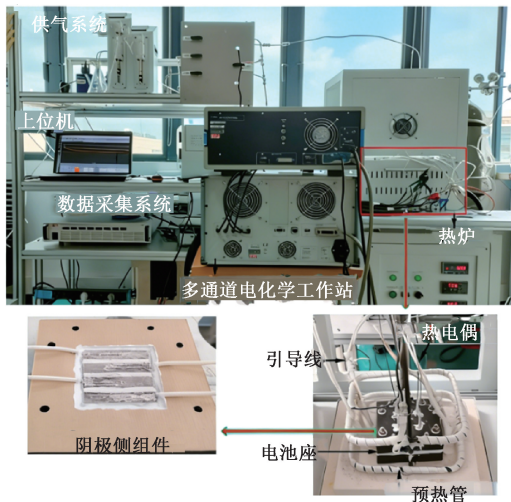


图 4 分段式 SOFC 测试系统
Fig. 4 Sectional SOFC test system

非侵入式监测技术的创新应用中,针对 6 单元交叉流 SOFC 堆的中位单电池,通过空气通道间隙在电池四角及中心非接触式布设 5 个 K 型热电偶,结合铂丝电压传感网络,构建了基于空间插值算法的温度场重构方案^[27]。该方案虽避免电极结构损伤并覆盖关键区域,但受限于传感器数量与空气通道非接触布设方式,导致表面温度测量与实际电极活性区存在系统偏差。且研究仅监测单电池热状态,缺乏相邻电池间热传导数据,无法完整表征电堆三维热力学特征。

随着研究尺度扩展至电堆层级,热管理系统的优化成为技术突破关键。采用外部歧管构型的 SOFC 堆,通过金属互连件流道结构与 Al_2O_3 基密封材料热膨胀

系数匹配设计,可显著提升高温工况下的结构耐久性。针对温度测量体系,采用 25 个热电偶均匀分布于各层燃料进出口、空气进出口及中心位置,虽能反映基础温度分布,但在高电流密度下,空气出口处温度显著升高且产生了约 10℃ 的温度梯度,导致热电偶难以精准捕捉动态温度变化。此外,外部歧管因与堆芯热解耦,虽提升热平衡能力,却可能因热量滞留加剧温度分布不均,影响测量的全面性和稳定性^[28]。图 5 为具有外部歧管结构的 SOFC 温度测量示意图。

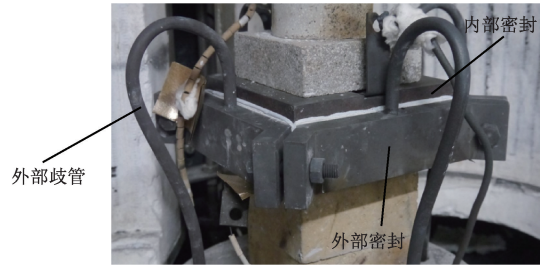
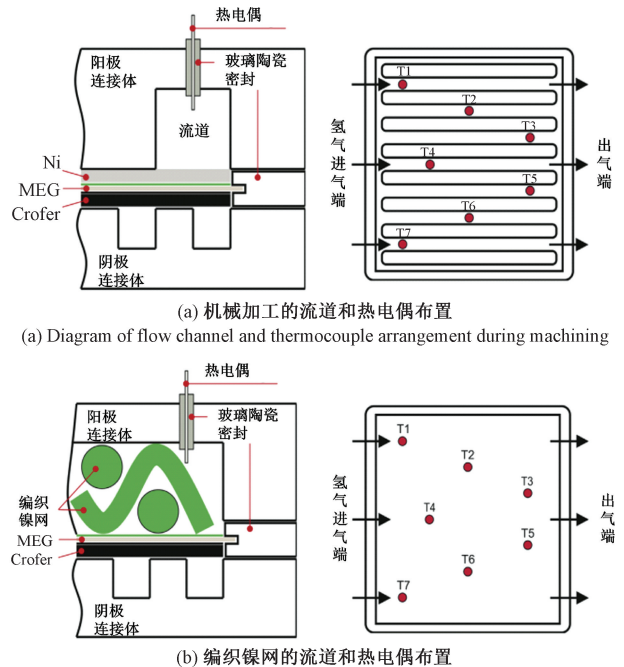


图 5 具有外部歧管结构 SOFC 温度测量
Fig. 5 SOFC temperature measurement diagram with external manifold

流场构型与几何特征作为电堆层级的核心设计变量,可通过调控反应气体分布均匀性以及热阻网络构建进而影响电堆温度场监测精度。如图 6 所示的布置了热电偶的短堆实验对比了机加工流道方案(设计 I)与编织镍网阳极流场方案(设计 II)两种 SOFC 短堆构型^[29]。



(a) 机械加工的流道和热电偶布置
(a) Diagram of flow channel and thermocouple arrangement during machining
(b) 编织镍网的流道和热电偶布置
(b) Diagram of flow channel and thermocouple arrangement with nickel mesh
图 6 不同流道方案的热电偶布置
Fig. 6 Diagram of thermocouple layout for different flow channel schemes

实验通过在阳极层上方 1 mm 处钻孔固定 7 个 K 型热电偶(玻璃陶瓷密封)以监测活性区温度,但机械钻孔导致结构损伤风险,且密封材料与金属部件热膨胀系数失配引发测量误差。尽管设计 II 展现出更优的温度均匀性,其热电偶布局仍受限于局部点位监测,无法捕捉全域温度分布及瞬态热波动,尤其在设计 I 气体分布不均时数据代表性显著降低^[29]。此外,针对平板式电堆的温度场分布特性,通过沿阳极流道等距布设 5 支 K 型热电偶的测量方案,系统对比了 16 与 81 cm² 在额定工况下的温度梯度差异。实验发现小尺寸电堆温度均匀,而大尺寸因焦耳热积累形成入口温度比出口高 40℃ 的显著梯度。流道入口处热电偶受外部热损失干扰导致测量值偏低,且高电流密度下阳极微观变形可能改变热电偶接触状态,加剧数据偏差^[30]。该研究揭示了活性面积对温度场的影响机制,但热电偶布局精度与材料形变问题仍制约测量可靠性。

虽然传统商业热电偶在 SOFC 温度监测中已形成标准化应用,但在高温复杂工况下面临显著的技术瓶颈。主要局限包括:宏观尺寸导致电堆内部多测点布设困难,热响应速率难以匹配动态温度场变化,以及封装结构对局部热场的干扰。为克服这些问题,磁控溅射沉积技术可通过纳米级薄膜厚度的精确调控制备高密度集成化的多通道热电偶阵列(multi-channel thermocouple array, MCTA)。该技术实现了热电偶的微型化设计,使传感器动态响应特性提升至毫秒级,同时显著提升了高温抗氧化性能与热循环稳定性,为 SOFC 内部微区温度场的精准监测提供了创新解决方案。

通过在 SOFC 阴极表面溅射沉积 K 型热电偶材料,延伸出 MCTA 温度传感技术,采用“N+1”架构减少热元件数量及对活性区的遮挡。单/双阵列(4/8 测点)通过银浆导线与氧化铝保护层实现高温测温,但银浆在 650℃ 以下热循环中易断裂导致信号中断,且电极-空气热惯性差异引起升/降温滞后效应,影响动态温度场精度^[31]。该技术虽提升空间分辨率,仍受材料稳定性与热响应匹配问题制约。

Guk 团队^[32-33]在前人研究的基础上,进一步发展了 MCTA 原位测量技术。该团队基于薄膜溅射技术在阴极表面原位集成多节点 MCTA,将空间分辨率提升 5 倍以上,可实时捕获电化学反应瞬态温度波动。图 7 为 Guk 团队^[32-33]研发的多节点热电偶阵列^[34]。相比流道入口安装的商用热电偶,MCTA 显著提高测量精度。然而,氧化铝粘合剂会引入接触热阻,且溅射工艺复杂性与高温下导线氧化/机械应力问题制约其长期可靠性^[34]。

除热电偶以外,电阻温度探测器(resistance temperature detector, RTD)网状传感器阵列同样适用于高温梯度和瞬态热冲击场景中的温度场监测。该设计

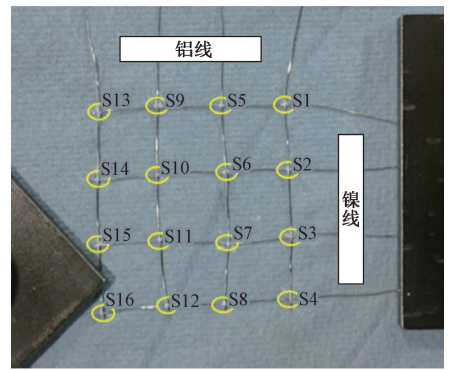


图 7 16SP 多通道热电偶阵列

Fig. 7 Diagram of 16SP multi-channel thermocouple arrays

通过电路节点拓扑优化,将 12 个 RTD 测温点的连接电缆缩减至 8 根,显著简化了实验装置复杂度,如图 8 所示。

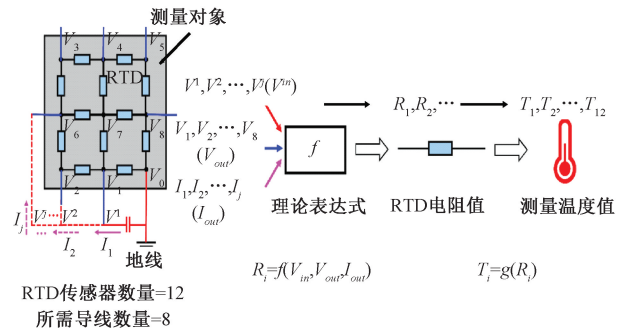


图 8 RTD 网格状传感器阵列工作原理

Fig. 8 Working principle of RTD grid sensor array

测试采用直流激励下外围节点电压-电流同步测量,结合基尔霍夫定律与欧姆定律反演内部节点电阻值,实现室温下 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的测量精度^[35]。然而,网格结构导致内部 RTD 电流较外围低 2 个数量级,微弱电流信号易受噪声干扰,导致内部节点温度反演误差增大。此外,传感器固定布局限制了空间灵活性,可能无法捕捉微小温度梯度。

传统热电偶测量技术虽可实现局部温度的高精度检测,但在实际应用中存在固有技术瓶颈。目前主流的接触式测温方案通常采用嵌入式传感器配置,将传感器表面贴装式布置或通过预制工艺将传感器集成于电堆内部。然而,由于电堆运行工况要求严格的气密性和电绝缘性,因此将多传感器嵌入电堆内部并不可行,这不仅可能导致堆体机械损伤,还会引发接触界面热阻异常,影响电堆稳定性和性能。此外,电堆经过高温烧制工艺后,形成玻璃基整体式层合结构,若采用物理拆解方式进行故障诊断,将不可逆破坏其结构完整性,导致失效机理分析失准。为了解决这一问题,当前研究重点转向非接触式温度传感技术开发。

基于堆外表面非接触式热电偶阵列(如图9所示)的分布式测温方法,通过插值算法重构二维温度场,成功应用于1 kW级电堆的实时状态监测与泄漏诊断^[36]。但该实验存在传感器空间覆盖率不足导致边缘区域数据缺失等问题,虽实现运行状态无损监测,但外部热场重构精度仍受限于传感器离散布点。

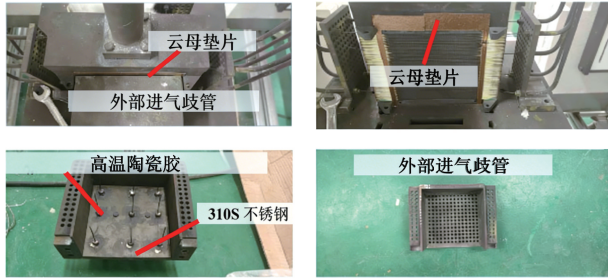


图9 测温孔板及非接触热电偶阵列安装示意图
Fig. 9 Installation diagram of temperature measuring perforated plate and non-contact thermocouple array

表1 热电偶测温技术测量SOC温度场分布研究对比

Table 1 Comparison of SOC temperature field distribution measured by thermocouple temperature measurement technology

文献	监测技术	热电偶类型	电堆种类	技术优势	测量局限性
[25]	多参数耦合温度监测系统	K型热电偶+毛细管阵列	中温SOFC	同步监测气体成分与温度分布,揭示甲烷重整动态机制	毛细管阵列引发湍流扰动;热电偶热惯性导致瞬时响应延迟
[26]	分段式SOFC集成热电偶	嵌入式K型热电偶	分段式SOFC	实现电化学性能与温度场的空间同步监测	热电偶密度不足;分段结构引入接触电阻;传感器扰动局部热场
[27]	非侵入式热电偶布局	非接触式K型热电偶	6单元交叉流SOFC电堆	规避结构破坏风险,构建温度云图	插值算法在边缘区域失真;仅监测单电池
[28]	外部歧管结构热电偶布局	K型热电偶(均匀分布)	外部歧管结构SOFC堆	简化组件数量,提升热平衡能力	空气出口热量积累形成高温梯度;热电偶无法捕捉动态变化
[29]	钻孔固定阳极层热电偶	K型热电偶(钻孔固定)	SOFC短堆(机械加工通道/编织镍网)	直接获取局部温度数据	钻孔破坏结构完整性;密封材料热膨胀失配;全域监测能力不足
[30]	流道关键区域热电偶布局	K型热电偶(流道布置)	电解质支撑型平面SOFC短堆	覆盖核心监测范围	入口热电偶受热损失影响;阳极变形导致接触状态变化
[31]	溅射沉积薄膜热电偶阵列	多通道薄膜热电偶阵列	阴极表面集成SOFC	微型化设计(毫秒级响应);高温抗氧化性提升	银浆连接在650℃以下失效;热惯性差异导致滞后偏差
[32-34]	高密度薄膜热电偶阵列	多通道薄膜热电偶阵列	阴极表面集成SOFC	空间分辨率提升5倍;捕捉瞬时温度波动	氧化铝粘合剂引入接触热阻;工艺复杂导致长期稳定性不足
[35]	RTD网格传感器阵列	RTD网格阵列	商用SOFC短堆	简化电缆数量(8根测12点);室温精度达0.51 K	内部节点信号微弱;固定布局限制空间灵活性
[36]	非接触式热电偶阵列	K型热电偶阵列(外部布置)	1 kW级SOFC电堆	无损测量实现实时监测与泄漏诊断	插值重构误差;未覆盖边缘区域;外部热干扰影响精度

在SOFC等高温复杂系统中展现出重要应用价值^[37]。相较于传统金属温度传感器,FBG传感器具备以下显著优

势:首先具有优异的抗电磁干扰性能,适用于存在强电磁噪声的复杂工况;其次具备高精度与长期稳定性,其线性

表1系统梳理了基于热电偶的温度传感技术在SOFC温度测量中的代表性研究成果。热电偶测温技术凭借成本低廉、响应快速和结构简单等优势,在SOC局部热点监测和基准温度分布获取中形成了标准化应用,尤其是在验证性实验和故障诊断中仍具实用价值。然而,其固有的空间分辨率不足、热惯性导致的动态响应迟滞、侵入式安装引发的结构干扰风险,以及在长期高温运行与热循环下面临的材料稳定性挑战,共同构成了该技术在实现SOC全域高精度、高时空分辨率、非干扰式温度场表征方面的核心瓶颈。因此,突破热电偶局限性的关键在于发展非接触式、分布式或融合式测温技术。

2.2 光纤测温技术

光纤测温技术,尤其是基于光纤光栅(fiber Bragg gratings, FBG)温度传感器的应用,近年来在高温及复杂工况下的温度监测领域受到了广泛关注。该技术通过光纤光栅对特定波长光信号的反射特性实现温度传感,

温度响应特性可确保监测数据的可靠性;此外支持多光栅复用技术,通过单根光纤集成多个传感节点,可提升部署效率并降低运维成本^[38]。

光纤光栅温度传感器测温原理基于光纤中的光栅效应。当光纤中的光波通过布拉格光栅时,特定波长的光被反射,而其他波长则透过光栅。随着温度的变化,光栅栅距 Λ 会发生变化,导致反射波长 λ_B 的偏移,测温原理如图 10 所示。

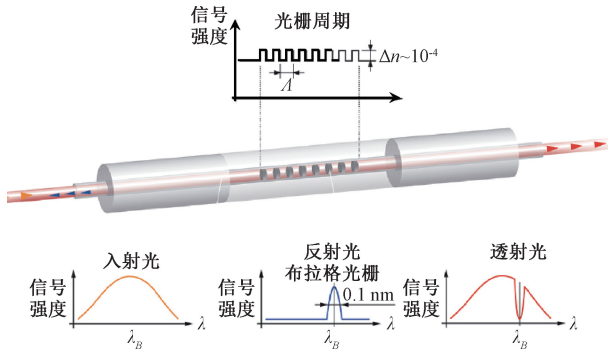


图 10 FBG 传感器工作原理

Fig. 10 Diagram of working principle of FBG sensor

如式(1)所示为反射波长和光栅栅距之间的对应关系:

$$\lambda_B = 2neff\Lambda \quad (1)$$

其中, $neff$ 为光纤的折射率,因此可以通过监测反射波长计算出温度变化。

温度引起 FBG 波长偏移的主要原因包括光纤热膨胀效应、光纤热光效应以及光纤内部热应力引起的弹光效应^[39]。当光纤周围温度发生变化时,FBG 的周期和有效折射率随之发生变化,最终导致其中心波长发生变化,由温度变化引起的中心波长变化可以表示为式(2),即:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T = k_T\Delta T \quad (2)$$

其中, $\Delta\lambda_B$ 是反射光波长变化; α 是热膨胀系数; ζ 是热光系数; ΔT 表示温度变化; k_T 是比例系数,即温度 T 的灵敏度。

传统光纤布拉格光栅主要采用紫外激光诱导制备工艺,通过紫外激光束对光纤纤芯区域进行局域曝光,引发纤芯材料的光致折射率调制效应,从而形成周期性折射率分布结构。然而,这种加工方式会导致光纤材料内部形成不稳定的缺陷结构,在长期高温工况下,周期性折射率调制结构易发生弛豫效应,导致布拉格波长漂移量超出允许范围,严重制约其在高温极端环境下的可靠性^[40]。

近年来,飞秒激光加工技术作为新型制备工艺,在光纤光栅制造领域展现出突破性应用潜力。与传统紫外激光诱导不同,该技术利用超短脉冲激光(皮秒量级)与光

纤材料的非线性相互作用机制,通过精确控制激光焦点在纤芯内部诱导永久性折射率调制。飞秒激光凭借超快脉冲特性,能实现高精度加工且无需依赖材料的光敏性,加工过程中产生的热量极少,从而显著增强了光纤在高温下的稳定性能。实验证实,飞秒激光直写制备的光纤光栅在 800℃ 高温环境及高氢浓度条件下仍能保持 <5 pm 的波长漂移量,展现出卓越的环境稳定性^[41]。

基于飞秒激光增强瑞利散射的分布式光纤传感技术,有团队实现 SOC 运行中温度分布的实时监测,实验装置如图 11 所示。实验表明,通过飞秒激光在单模光纤芯区诱导纳米光栅结构,可使瑞利散射信号强度提升 40 dB 以上,并利用光频域反射(optical frequency domain reflection, OFDR)技术实现 5 mm 空间分辨率的分布式温度测量。该技术在 800℃ 氢环境中展现出显著优势,在极端环境下具备长期稳定性^[42]。但极端条件下局部散射特征的非均匀衰减仍可能引起温度分布测量的系统性误差。

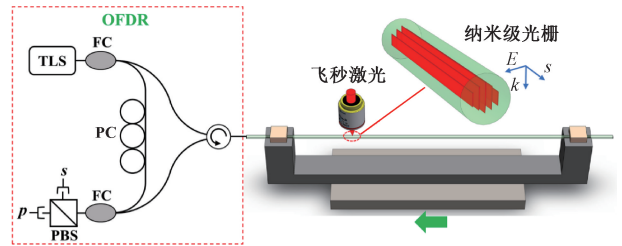
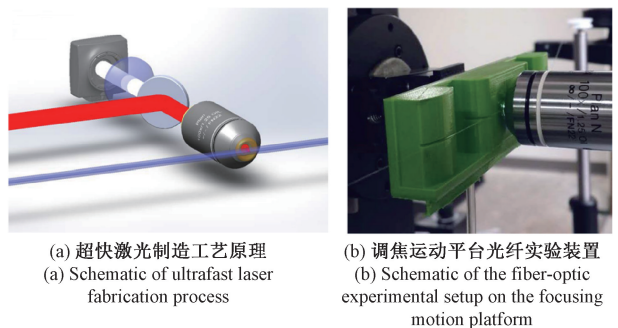


图 11 飞秒激光增强光纤瑞利散射装置

Fig. 11 Diagram of femtosecond laser-enhanced fiber

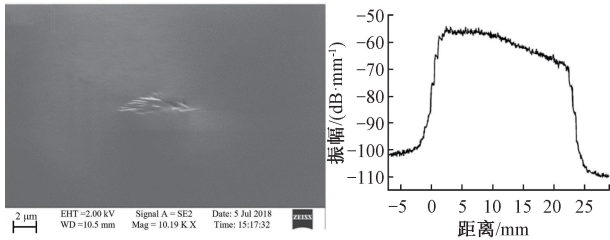
Rayleigh scattering device

此外有研究团队通过机械封装工艺将飞秒激光微结构强化型分布式光纤传感器集成于 SOC 互连板内部流道,实现在 800℃ 氧化性环境下的稳定温度监测,空间分辨率提升至 4 mm。图 12 为飞秒激光技术蚀刻光纤光栅装置示意图。实验通过多点分布式测量实时捕捉电池运行时的温度梯度分布,并通过对数据进行线性插值绘制二维温度场分布图像,验证了不同氢燃料浓度和电流负载对温度场的影响,其中阳极侧温度变化 <5℃,阴极侧 <3℃^[43]。



(a) 超快激光制造工艺原理
(a) Schematic of ultrafast laser fabrication process

(b) 调焦运动平台光纤实验装置
(b) Schematic of the fiber-optic experimental setup on the focusing motion platform



(c) 光纤样品横截面纳米光栅结构的扫描电镜
(d) OBR表征的光纤样品瑞利背向散射分布
(c) SEM schematic of cross-sectional nano-grating in fiber
(d) Schematic of the Rayleigh backscattering profile in the fiber sample characterized by OBR

图 12 飞秒激光技术蚀刻光纤光栅装置

Fig. 12 Diagram of FBG etching device by femtosecond laser technology

随着 FBG 传感器的不断发展,一种基于可再生光纤布拉格光栅(renewable FBG, RFBG)的 SOFC 多点温度监测方法被提出。通过在不锈钢引导管内集成 7 个波长复用 RFBG 传感器,实现空气流道的毫米级空间分辨率测温,如图 13 所示。传感器经 800℃ 退火和氢气扩散处理增强高温稳定性,结合多项式校准模型与动态采样策略(0.05 ~ 1 Hz),在 800℃ 下测量结果与热电偶温差 <5℃^[44]。实验证实 RFBG 在动态工况下较热电偶具有更优的瞬态响应特性,且规避了电极短路风险,但引导管安装可能影响堆体密封性。

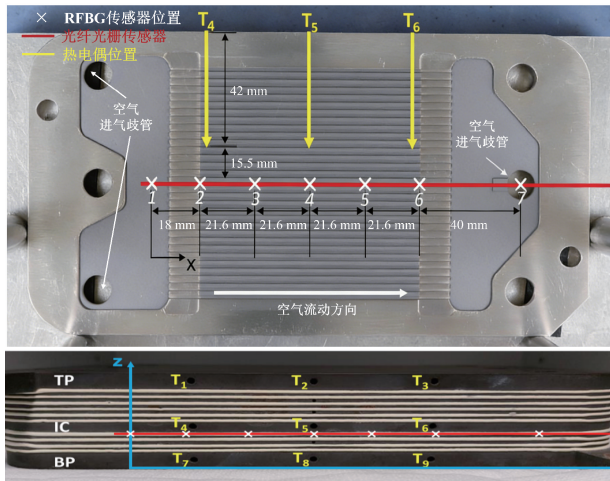


图 13 RFBG 传感器和 N 型热电偶安装示意图
Fig. 13 RFBG sensor and N-type thermocouple installation diagram

此外,基于多通道非接触测温阵列的检测系统,通过在电堆近表面区域离散化布设独立测温节点,结合机械臂运动控制实现非接触式动态监测,有效维持电堆气密性与运行稳定性。实验通过将 9 根直径 0.4 mm 的石英光纤集成为 3×3 阵列,插入 1 kW 电堆的阴极流道中,通过三轴机械手控制光纤以 1 mm 分辨率沿流

道移动扫描,在 750℃ 高温下实现温度分布动态监测^[45-48]。

如图 14~15 所示^[45-46]为基于光纤测温的温度测量实验平台及光纤阵列实验装置示意图。然而,非接触测温需要借助热辐射及热对流理论模型,易受外界环境干扰,可能引发温度分布重建存在误差。

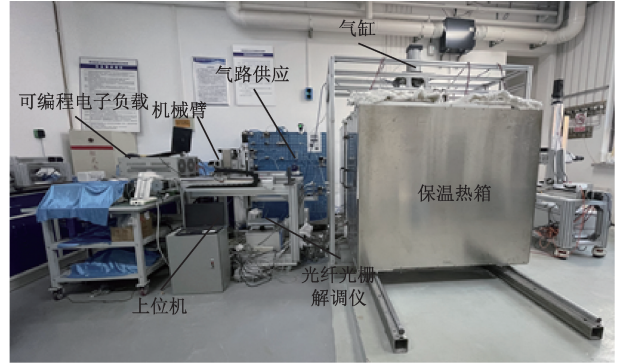


图 14 基于光纤测温的温度测量实验平台

Fig. 14 Diagram of the temperature measurement experimental platform based on optical fiber temperature measurement

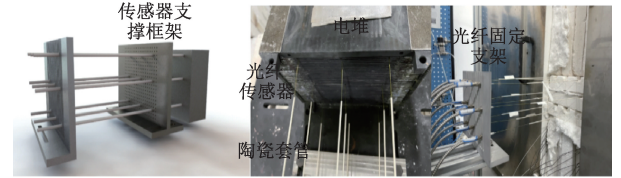


图 15 光纤阵列实验装置

Fig. 15 Diagram of the optical fiber array experimental device

传统二氧化硅光纤因缺陷结构的不稳定性,在潮湿或还原性环境中超过 500℃ 时会出现显著性能退化。相比之下,单晶蓝宝石光纤在极端温度场和严苛化学环境下仍能保持优异的稳定性特征,其实际工作温度上限可接近蓝宝石的熔点(约 2 000℃)^[49]。虽然蓝宝石光纤的制备成本相对较高,但其在 SOC 系统中的引入可显著提升关键组件的机械强度并延长装置使用寿命。

分布式光纤传感器不仅局限于电堆温度场的动态监测,更可通过在光纤表面涂覆功能化涂层实现对氢气浓度的灵敏检测。这类敏感涂层通过物理吸附或化学反应机制与氢气相互作用,引发光纤折射率或光传输特性的可逆变化,在此基础上借助分布式光纤传感技术可实现氢气流量与浓度的实时定量分析^[50-51]。该技术特征使单一传感器系统能够同步获取热力学参数与气体组分信息,为 SOC 运行状态的多维监测体系构建提供关键数据支撑。

2.3 红外测温技术

红外测温技术的理论依据源于黑体辐射定律。根据该物理定律,任何温度高于绝对零度的物体都会自发产

生红外辐射现象, 这种电磁波辐射的强度及其在波长维度上的分布特征与物体表面温度存在严格的定量关系。具体而言, 物体热辐射的总能量密度遵循 Stefan-Boltzmann 定律, 与绝对温度的四次方成正比; 而辐射能量的波长分布规律则可通过普朗克公式精确描述^[52]。红外温度传感器通过非接触式地采集目标物体表面发射的红外辐射能量, 基于普朗克辐射定律的数学关系式, 对接收辐射的能谱特征进行解析, 最终获得被测物体的表面温度参数。

相较于传统接触式测温方法, 红外测温技术展现出显著的非接触测量特性, 尤其适用于燃料电池表面温度场在动态工况下的精确监测。该技术空间分辨率可达 1 mm 以下, 其快速数据采集特性可完整捕获动态热现象的瞬态变化过程, 构建满足热力学模型需求的高精度温度场数据集。红外测温技术基于光电转换机制将目标物辐射的红外光谱转化为可见光信号, 进而形成二维温度场分布图像, 结合计算机视觉算法与辐射标定模型, 最终实现温度场数据的定量化解析^[53]。图 16 为红外测温技术的工作原理示意图。该技术在燃料电池系统性能评估、动态热力学过程分析等领域具备显著应用价值。

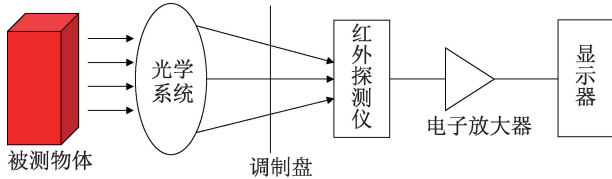


图 16 红外测温技术工作原理

Fig. 16 Diagram of working principle of infrared temperature measurement technology

在平面共流型阳极支撑 SOC 瞬态温度分布特性研究中, 针对不同炉温条件下电化学反应与直接内重整 (direct internal reforming, DIR) 的独立及耦合作用展开测试。研究通过配备蓝宝石观察窗的氧化铝电池支架与定制电炉系统, 实现了运行中电池的非接触式红外热成像监测, 实验装置如图 17 所示。

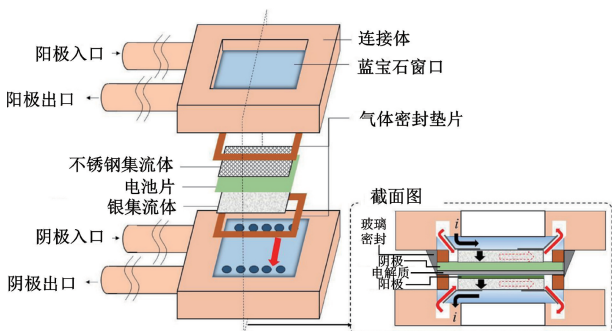


图 17 特制金属连接体及电堆安装示意图

Fig. 17 Special metal connection and stack installation diagram

基于热电偶校准的红外相机在 670°C ~ 770°C 范围达到 0.4°C 的均方根误差精度误差精度, 结合高空间分辨率技术获取了二维温度场分布^[54-55]。然而, 蓝宝石/氟化钙观察窗的特定透射波段限制检测范围, 部分波长衰减可能导致温度场失真。不锈钢网电流收集器虽避免催化干扰, 但其高热导率与网状结构仍引发局部红外辐射遮挡, 并通过热扩散平滑真实温度梯度, 导致高温区域系统测量偏低。此外, 电炉热辐射背景噪声及观察窗-电池寄生热传导进一步增加测量不确定性。尽管恒温控制优化与透射窗口匹配抑制了部分干扰, 但仍需校正系统性偏差。

为克服单一红外测温的局限性, 提出了集成 Sagnac 干涉仪与红外测温技术的方法, 实现 SOC 阳极表面形变与温度场的同步监测。其中, Sagnac 干涉仪基于分光路径设计实现高灵敏度形变检测且具备抗环境振动干扰特性^[56]。但其精度受限于镍基表面的光学反射特性, 且表面粗糙度或塑性形变易导致干涉条纹识别误差。红外测温通过热电偶校准提升局部精度, 但在小尺寸电池中光斑覆盖不足会导致空间分辨率受限, 且氢气/空气混合气氛下的动态校准偏移会增加测量不确定性。

针对空间分辨率不足的技术瓶颈, 通过集成高灵敏度热成像系统实现电解模式下电极表面温度梯度的非侵入式动态捕捉。实验采用电解质支撑结构结合铂网电流收集器, 在水平炉内同步开展电化学与热成像实验。该系统具备 60 mK 灵敏度和 30 Hz 动态捕捉能力, 揭示了电解过程中从吸热到焦耳加热的热模式转变^[57]。但铂网电流收集器的高导热性引发局部热沉效应, 导致温度梯度失真; 电池表面粗糙度差异引起的发射率不均也增加了测温误差。图 18 为该实验采用高分辨率热成像技术测温系统流程示意图。

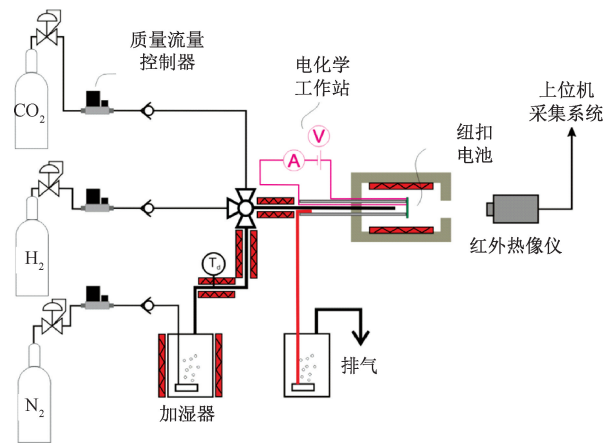


图 18 红外热像仪测温系统流程

Fig. 18 Flow chart of temperature measurement system of infrared thermal imager

在固体氧化物电池直接重整 (DIR-SOFC) 多参数监测领域, 研究人员开发了集成振动拉曼光谱 (vibrational raman spectroscopy, VRS) 与红外测温技术的同步检测系统, 实现了重整器内气体组分浓度与阳极表面温度场的原位实时测量^[58], 测试系统如图 19 所示。其中 VRS 通过脉冲激光实现非侵入式气体分析, 但受光学窗口密封不足影响导致 H_2 测量偏差; 红外测温因固定发射率 (0.92) 假设忽略重整条件变化, 引发绝对温度系统误差 (± 1 K)。

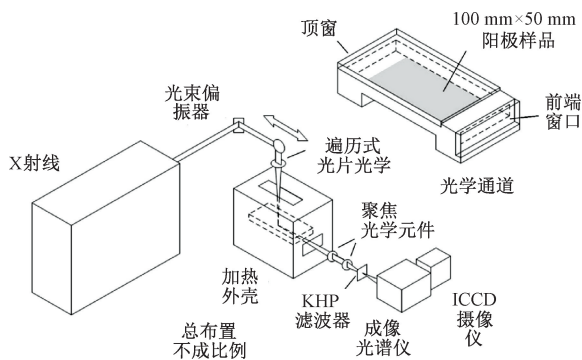


图 19 DIR-SOFC 重整器模型及测量装置

Fig. 19 DIR-SOFC reformer model and measuring device

除中红外测温技术外, 近红外光谱高分辨成像技术通过硅基电荷耦合器件 (silicon based charge-coupled device, Si-CCD) 可实时监测 SOC 阳极表面温度场分布, 并研究了流体成分对 Ni/YSZ 阳极材料热力学响应的影响机制^[59]。该技术兼具低成本与操作便捷性, 结合热电偶校准可实现高空间分辨率与温度灵敏度, 适配 SOC 高温工况。然而, 高温易导致光学组件热漂移或损伤, 长期稳定性受限, 且 5 Hz 采样频率难以捕捉快速动态温度变化。此外, 高温热噪声与反应副产物对光路的污染可能降低信噪比, 影响细微温度梯度识别精度。图 20 为基于硅电荷耦合器件相机的近红外热成像示意图。

综上系统梳理了基于光纤与红外的温度测量技术在 SOC 温度场监测中的代表性研究成果, 如表 2 所示。光纤传感技术凭借抗电磁干扰性、分布式测量能力及高温适应性, 在极端环境监测中展现出独特优势。

但是, 其信号易受非均匀衰减影响, 光纤封装模式存在泄漏风险, 且蓝宝石光纤的高昂成本进一步制约工程化应用; 红外热成像虽实现非接触、高时空分辨率表面测温, 却受限于发射率依赖性、热沉效应及内部不可测的物理瓶颈。因此, 二者均需通过技术融合与算法补偿突破单模态局限。

3 SOC 应力测量技术

基于 SOC 温度场分布测量技术的研究基础, 本文进

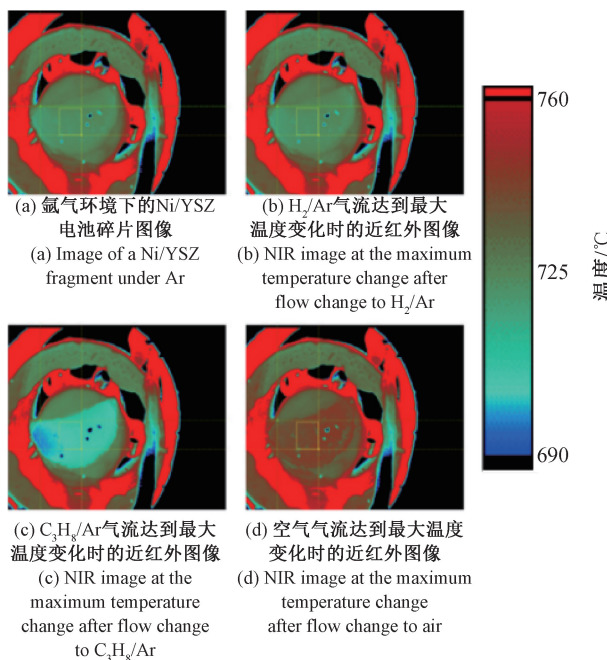


图 20 基于硅电荷耦合器件相机的近红外热成像

Fig. 20 Diagram of near infrared thermal imaging based on silicon charge-coupled device camera

一步探讨了电堆应力表征技术。由于电堆内部三维温度梯度的空间非均匀性与组件材料热膨胀系数的非线性失配, 导致堆组件界面剪切应力与局部应变聚集, 尤其在快速变载过程中, 温度梯度的瞬态突变会加剧电堆应力梯度。同时, 高温下材料的塑性变形、蠕变松弛行为及长期运行中电极微观结构的粗化, 使得应力场演变呈现出显著的时间依赖性。这种温度梯度驱动下的空间应力非均匀性与材料时变特性共同作用, 导致电堆应力分布具有热-力-电化学多场耦合的动态特征。

基于电堆内部三维温度梯度空间非均匀性与组件材料热膨胀系数的非线性失配导致的应力问题, 数字图像相关技术 (digital image correlation, DIC) 提供了高精度、非接触式的动态应力测量方案。

DIC 技术通过追踪物体表面散斑场的变形, 同步获取位移、应变及形貌的全场分布数据, 尤其适用于高温、瞬态变载等复杂工况下的多场耦合分析。研究采用高温兼容的三维 DIC 系统, 通过双 CCD 相机与蓝光滤波装置, 透过 1 400℃ 高温炉的石英窗口监测样品; 样品以 60° 倾角固定于陶瓷支架上, 并在阳极侧喷涂耐温 1 200℃ 的钴氧化物斑点作为变形标记; 实验以 10℃/min 速率升温至 1 350℃, 期间每 100℃/200℃ 暂停采集变形数据, 并在 1 200℃ 和 1 350℃ 保温 4 h 以观察再烧结效应。图 21 为半电池 SOFC 的实时变形监测实验装置。测量结果表明, 加热阶段半电池向阳极基板方向翘曲 (中心最大位移 38 μm), 而冷却后发生反向变形达 350 μm , 揭示了高

表 2 光纤测温技术/红外测温技术测量 SOC 温度场分布研究对比

Table 2 Comparison of SOC temperature field distribution measured by optical fiber temperature measurement technology/infrared temperature measurement technology

文献	监测技术	传感器布置方案	电堆种类	技术优势	测量局限性
[42]	飞秒激光增强瑞利散射光纤传感	互连板嵌入式布置	商用 SOFC	5 mm 空间分辨率, 800°C 长期稳定, 瑞利信号提升 40 dB	非均匀衰减导致系统误差, 极端条件信号衰减
[43]	飞秒激光强化分布式光纤传感	互连板嵌入式布置	商用 SOFC	4 mm 空间分辨率, 实时温度梯度捕捉, 二维温度场可视化	局部散射特征衰减可能影响精度
[45-48]	热电偶+光纤复合检测系统	电堆近表面离散测温节点, 滑动/固定双模	kW 级 自研 SOFC 电堆	非接触式监测, 模块化可拆卸, 600°C~1 000°C 耐高温, 多通道提升空间分辨率	依赖热辐射模型, 高温响应非线性衰减, 环境干扰误差
[54-55]	红外热成像	蓝宝石窗口非接触式观测	平面共流型阳极支撑 SOFC	0.4 K 精度, 670°C~770°C 范围, 高空间分辨率二维场分布	窗口透射波段限制, 不锈钢网热扩散导致梯度失真, 背景噪声干扰
[56]	Sagnac 干涉仪+红外测温	阳极表面非接触式	纽扣型 SOFC	抗振动干扰, 半波长灵敏度, 形变与温度同步监测	表面粗糙度影响精度, 光斑覆盖有限, 氢气环境校准偏移
[57]	高分辨率热成像	电解质支撑 SOC 表面非接触式	电解模式 SOC	60 mK 灵敏度, 30 Hz 动态捕捉, 揭示吸热-焦耳加热转变	铂网热沉效应, 表面粗糙度影响发射率, 环境温漂噪声干扰
[58]	振动拉曼光谱+红外测温	重整器内气体通道+阳极表面非接触式	DIR-SOFC	气体成分与温度同步监测, 非侵入式多组分检测	校准复杂, 窗口密封不足导致误差, 发射率假设不准确 (固定 0.92), 预热不足干扰
[59]	近红外光谱成像 (Si-CCD)	阳极表面非接触式	Ni/YSZ 阳极 SOFC	高空间分辨率, 热电偶校准, 适配高温工况, 低成本便捷操作	光学组件热漂移, 5 Hz 采样频率限制动态捕捉, 热噪声和污染影响信噪比

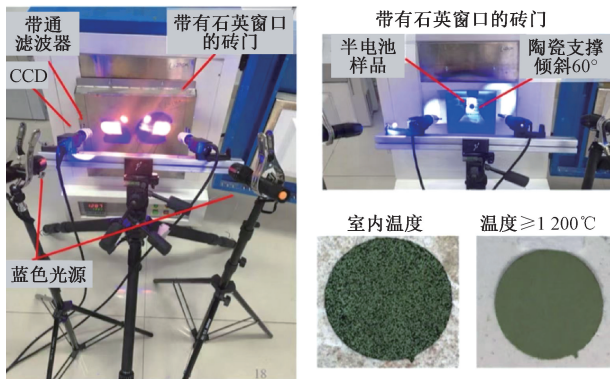


图 21 半电池 SOFC 实时变形监测实验装置

Fig. 21 Diagram of the real-time deformation monitoring experimental device for half-cell SOFC

DIC 技术还可评估 SOC 组件 (如 1~2 μm 8YSZ) 的局部残余应力。在某项研究中, 聚焦离子束 (focused ion beam, FIB) 铣削结合数字图像相关技术提供了一种有效的局部测量方法。研究人员通过在样品表面制备标记点阵, 利用 FIB 精密铣削环形沟槽诱发局部应力松弛, 导致周围区域产生微小位移。铣削前后, 借助扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 原位成像, 并通过 DIC 软件分析图像位移场, 进而推导出应变变化。应用此技术测得应力松弛导致的应变约为 0.2%, 结合纳米压痕获得的双轴模量 (约 155 GPa), 计算出电解质层存在约 300 MPa 的残余压应力, 该结果与热膨胀失配理论预测相符^[62]。然而, 该方法对样品表面平整度和低粗糙度要求苛刻, 且薄膜双轴模量的准确测量易受基底效应干扰, 加之人工标记制备和图像分析步骤复杂, 限制了其广泛应用。

高能射线因其独特的优势, 被认为在 SOC 应力测量中具有重要的应用潜力。作为一种非破坏性检测手段, X 射线能通过衍射图像揭示晶体材料内部的缺陷分布。在 SOC 中, 该技术可用于检测电解质和电极材料中的微观缺陷, 如错位、孔隙和晶界等, 这些缺陷对堆体的性能和寿命有重要影响。该技术对缺陷引起的应力场变化较

温烧结导致的不可逆体积收缩^[60-61]。然而, 斑点材料在高于 1 200°C 时失效, 且 1 350°C 高温辐射严重干扰成像, 迫使实验中需冷却后重新制斑, 导致高温段数据缺失与变形连续性中断。这些缺陷限制了 DIC 对极端高温下应力演化的完整表征, 需依赖有限元模拟间接推断应力。

为敏感,有助于深入理解 SOC 在多物理场耦合条件下的性能退化机制。此外,X 射线结合同步辐射技术,能够在高温条件下实现对 SOC 内部结构的原位观测,为研究材料在高温下的应力演化提供有力支持^[63]。

基于同步辐射 X 射线衍射与红外热成像多模态联用技术,Robinson 等^[64-65]首次建立了 SOFC 阳极热梯度场与晶格应变的动态关联模型。研究采用氟化钙光学窗口实现热膨胀系数与晶格参数的双通道同步监测,实验数据证实非线性热膨胀行为可诱发高达 120 MPa/mm 的轴向应力梯度。然而,受 X 射线探测器像素尺寸限制,局部应力梯度可能超出当前技术检测阈值,导致微观应力场表征存在盲区。图 22 为该实验成像平台示意图^[64],图中 1 表示红外成像方向,2 表示 X 射线入射方向,3 表示平台平移方向,4 表示外部冷却回路,5 表示气体预热管路。

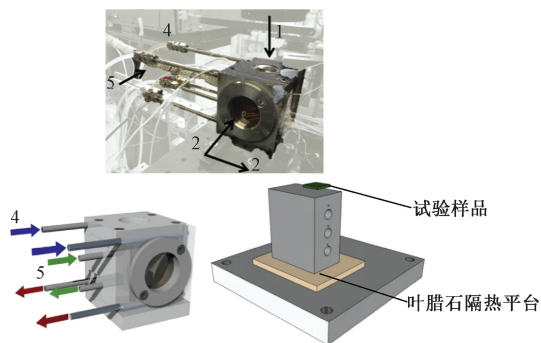


图 22 实验用炉膛及气路示意图

Fig. 22 Diagram of furnace and gas path for experiment

在静态应力表征方面,Yakabe 团队^[66-67]通过耦合同步辐射 X 射线衍射与有限元数值模拟方法,如图 23 所示,成功实现 30 μm 电解质层的穿透深度并有效抑制多孔阳极基底信号干扰,获得 ~ 650 MPa 的残余压应力测量。研究证实同步辐射 X 射线的高通量、单色性及深度分辨能力在多层陶瓷体系应力表征中具有独特优势,然而其空间分辨率受限于约 50 μm ,且基于理想弹性体的 X 射线弹性常数理论假设可能引入系统性误差。

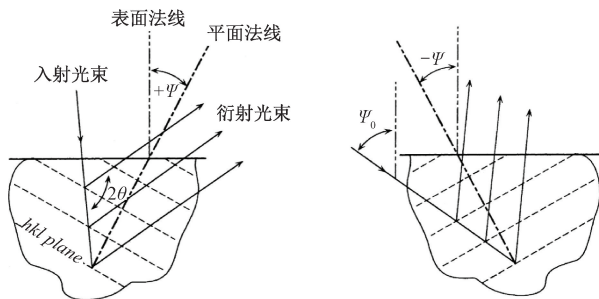


图 23 X 射线衍射应力测量示意图

Fig. 23 Diagram of stress measurement by X-ray

针对传统离线测量滞后性,研究了阳极支撑平面型 SOFC 与分段串联型 SOFC 在氧化还原条件下的机械行为。通过构建高温原位 X 射线衍射实验系统并集成 PILATUS 二维探测器,如图 24 所示,实现了 SOFC 在 800 $^{\circ}\text{C}$ 运行工况下电解残余应力的动态演变监测。其时间分辨率较传统方法提升两个数量级,首次揭示了电解过程中残余应力的实时演化规律^[68-69]。然而,该方法对高亮度 X 射线光源和精密温度控制系统的依赖性限制了其广泛应用,相关技术瓶颈仍需进一步突破。

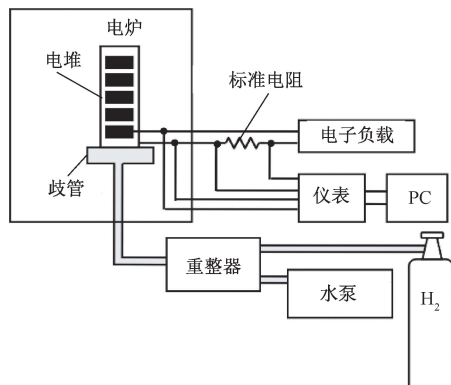


图 24 X 射线残余应力原位测量实验装置

Fig. 24 Experimental device for in-situ measurement of X-ray residual stress

此外,研究采用 X 射线衍射“ $\sin^2\psi$ ”技术对半电池样品进行残余应力测试,重点探讨了电池放大过程中孔尺寸、孔形状等几何参数对残余应力及曲率状态的影响^[70]。结果表明,孔尺寸与形状等几何参数显著影响曲率半径,但对残余应力水平无统计学显著影响——在 400 μm 厚阳极基底的电解质层中测得残余压应力约为 -610 MPa。该结果验证了 X 射线衍射技术对宏观应力的检测有效性,但室温静态测试条件无法表征高温/化学应力耦合效应,需结合动态热场研究以完善应力评估体系。

在了解 SOFC 宏观应力分布机制后,研究逐步聚焦于界面介观尺度特性,进而阐明应力梯度集中与结构失效行为的跨尺度作用规律。通过原位 X 射线衍射与扫描电子显微镜的协同分析,揭示了还原性气氛下阳极-电解质界面处高拉伸应力对电解质裂纹网络形成的驱动机制^[71]。原位 XRD 测量系统如图 25 所示。研究首次在介观尺度实现了应力演化与结构失效的因果关联验证,但受 X 射线穿透深度限制,微观应力梯度的空间分辨能力尚未突破。

在介观应力梯度演化理论基础上,研究进一步拓展至电极表面化学-电化学耦合过程的动态解析。通过集成环境压力 XPS 与 NEXAFS 技术^[72],首次实现了中温固体氧化物电解池电极表面化学态-电化学性能的动态关联分析。基于定量光谱解耦模型的构建,阐明了镍/掺杂

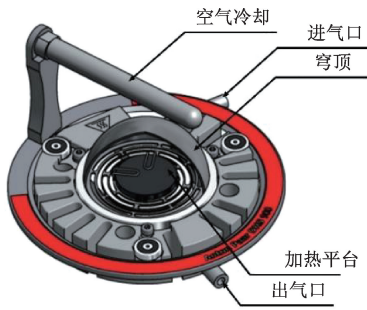


图 25 原位 XRD 测量系统

Fig. 25 In situ XRD measurement system

氧化铈电极活性位点的氧化还原动力学路径,为电解电压-温度操作窗口优化提供新理论支撑。然而,同步辐射 X 光源的穿透性严重制约了其工程适用性。

综上所述,X 射线成像技术在近表面应力检测中具有高分辨率优势,但其穿透能力随原子序数增加呈指数衰减,难以解析高密度介质包裹的内部结构。在此技术瓶颈下,中子成像因其独特的核相互作用机制展现出突破性潜力:中子束流对多数金属材料的穿透深度可达厘米级,且对轻元素化学态变化敏感,使其能够实现封装体系内部的三维应力场重构。然而中子成像需依托反应堆或散裂中子源等大型装置,受限于全球设施稀缺性,实验成本显著增加。同时受中子通量限制,单次数据采集通常需数小时,时间周期较长严重制约动态过程的实时监测。目前公开报道中,仅有少数研究采用中子衍射技术解析 SOFC 封装结构宏观残余应力分布。

Makowska 等^[73]首次采用能量分辨中子成像技术实现了对商用 SOFC 阳极支撑层中还原反应的动态追踪,同时揭示了外部压缩应力对 NiO 还原速率的加速效应。此外,他们还通过能量分辨中子成像首次观测到氧化还原循环中 Ni-YSZ 材料的双向加速蠕变现象,证实外加载荷通过调控微观密度差异增强蠕变-相变协同效应^[74]。

图 26 为施加外部载荷样品的中子透射图像^[73]。

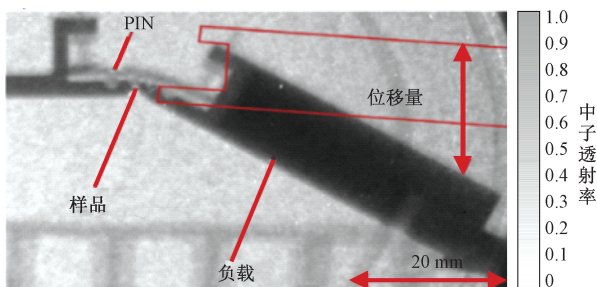


图 26 施加外部载荷样品的中子透射图像

Fig. 26 Image of neutron transmission of the sample under an external load

本实验证实,中子成像技术凭借其高穿透性、非破坏性及优异空间分辨率,在复杂环境多相材料研究中具有不可替代的优势:不仅能穿透金属封装结构实现多孔复合体系相变动力学的原位追踪,还可避免传统破坏性表征(如切片取样)引发的应力场扰动,为解析材料宏-微观跨尺度演化机制提供了独特技术路径。

综上系统梳理了基于 DIC 技术及高能射线的应力测量技术在 SOC 温度场监测中的代表性研究成果,如表 3 所示。DIC 技术凭借非接触、全场应变测量优势,在解析电堆表面变形行为方面具有重要价值,但其高温适应性受限于散斑材料稳定性及动态测量连续性。高能射线成像技术(X 射线/中子)在穿透性与空间分辨率上展现显著潜力,尤其适用于内部应力及微观结构表征,然而其设备依赖性(如同步辐射光源、大型中子源)、高昂成本及有限的时间分辨率(如中子成像需长时间采集),构成了当前技术推广的固有瓶颈。因此,发展兼顾高精度、强穿透性及良好工程适用性的非侵入式应力测量技术,是突破 SOC 全域应力感知的关键方向。

4 SOC 无损测量技术展望

4.1 声学温度测量及融合式测温方案

综上所述,热电偶测温成本低、响应快,适用于常规温度监测,但在高温或强电磁环境下精度受限。光纤测温抗干扰性强、耐高温,适合极端环境,但成本较高。红外测温可实现非接触快速测量,但易受表面特性影响。

基于现有测温技术的局限性,声学测温技术在 SOC 系统中展现出潜在应用价值。该技术依据声波传播速度与温度的物理相关性实现温度场重构,已在高温高压环境、非接触式测量等特殊工况中获得成功应用。例如冶金工业中的高温反应装置,声学传感方法(如超声波测温)可有效获取装置内部空间温度分布,尤其在温度梯度显著或传统传感器不可达区域,能够提供高可靠性的实时温度数据^[75]。

SOC 系统在高温工况下的持续运行,使其具有声学测温技术的应用潜力,尤其在电堆内部传感器安装受限的特殊场景中。该技术已在航空航天动力系统等极端环境中得到验证,其动态监测能力与 SOC 的严苛运行条件高度匹配^[76]。研究表明,声学测温在核工业高温辐射环境的应用经验可直接迁移至 SOC 系统,能够有效实现三维温度场重构,在强辐射或腐蚀性介质等特殊工况下更具技术优势^[77]。

超声波作为一种高频机械波,其传播特性与介质的温度、密度及弹性模量等参数密切相关,其中温度敏感性尤为显著。在气态或固态介质中,超声波的相速度随温度升高呈单调递增趋势。基于这一特性,通过测量超声波在电堆中的渡越时间或谐振频率偏移,即可实现温

表3 高能射线成像技术测量SOC应力场分布研究对比

Table 3 Comparison of stress field distribution in SOC measured by high energy ray imaging technology

文献编号	监测技术	测试方案	电堆种类	技术优势	测量局限性
[57-58]	3D 数字图像相关法	集成微/纳米压痕实验与有限元模拟,表征材料属性并模拟烧结过程	阳极支撑平板式 SOFC 半电池	实时捕捉高温变形,结合实验与模拟校准蠕变模型,估算应力演化	DIC 高温测量受限于斑点稳定性($\leq 1\ 200^\circ\text{C}$)
[59]	聚焦离子束+数字图像相关法	FIB 铣削环形槽释放残余应力,DIC 分析铣削前后图像获取应变变化	含超薄($1.5\ \mu\text{m}$) 8YSZ 电解质的 SOFC	可精准测量微米级薄层电解质的局部残余应力	弹性模量测量受基底影响,仅获局部点应力
[60-61]	同步辐射 X 射线衍射+红外热成像	双通道同步监测(热膨胀系数+晶格参数),建立热梯度场与晶格应变的动态关联模型	未明确	首次实现非线性热膨胀行为与应力梯度的关联($120\ \text{MPa}/\text{mm}$ 轴向应力梯度检测)	探测器像素尺寸限制导致微观应力场存在盲区
[62-63]	同步辐射 X 射线衍射+有限元模拟	穿透 $30\ \mu\text{m}$ 电解质层,抑制多孔基底干扰,静态残余应力测量	未明确	高通量、单色性及深度分辨能力,测得 $\sim 650\ \text{MPa}$ 残余压应力	空间分辨率受限($\sim 50\ \mu\text{m}$),理想弹性体假设引入系统误差
[64-65]	高温原位 X 射线衍射	集成 PILATUS 二维探测器,动态监测 800°C 工况下电解残余应力演变	平面型/分段串联型 SOFC	时间分辨率提升两个数量级,揭示残余应力实时演化规律	依赖高亮度 X 射线光源和精密温控系统,工程适用性低
[66]	X 射线衍射“ $\sin^2\psi$ ”技术	室温静态测试,分析孔尺寸/形状对残余应力及曲率的影响	半电池样品($400\ \mu\text{m}$ 阳极基底)	验证宏观应力检测有效性($-610\ \text{MPa}$ 残余压应力)	无法表征高温/化学应力耦合效应,需结合动态热场研究
[67]	原位 XRD + SEM 协同分析	介观尺度关联应力演化与结构失效,揭示阳极-电解质界面高拉伸应力驱动裂纹机制	未明确	首次实现应力梯度集中与结构失效的因果验证	X 射线穿透深度限制,微观应力梯度空间分辨能力不足
[68]	环境压力 XPS+NEXAFS	动态解析电极表面化学态-电化学性能关联,构建氧化还原动力学路径模型	中温固体氧化物电解池	首次实现化学态-电化学性能动态关联,优化电压-温度操作窗口	同步辐射 X 光源穿透性差,难以工程应用
[69-70]	中子成像技术	能量分辨中子成像追踪还原反应动态,观测双向加速蠕变现象	商用 SOFC 阳极支撑层	高穿透性(厘米级)、非破坏性,可穿透金属封装实现多相材料原位追踪	依赖大型中子源设施,实验成本高;单次采集需数小时,动态监测能力受限

度场的非接触式测量^[78]。相比传统接触式测温方法,超声波传感技术具有非侵入、响应快、环境友好、免维护等优势,特别适合电堆全域温度场的无损监测。

超声波测温技术主要包括渡越时间法和相位干涉法两种实现方式^[79]。渡越时间法通过测量超声波传播时间差,结合声速-温度关系实现温度场重构,具有实现简单、计算量小等优点,适用于温度急剧变化的场景。但该方法测量精度受时间分辨率限制,且易受时间抖动影响,在非均匀介质或强温度梯度场中会产生系统误差。相位干涉法则利用超声波相速度的温度依赖性,通过分析相位特征参数实现温度测量,能在微小温度变化时实现高分辨率测量。虽然该方法在微观热场表征方面优势明

显,但由于需要高精度相位检测系统,系统复杂度较高,应用范围受到一定限制。

传统超声波测温技术主要应用于气态和液态介质,而超声波波导测温技术则针对极端环境下的精密温度监测,特别适用于固态及特殊介质,显著提高了测量稳定性和空间分辨率。该技术的核心原理基于固态波导的声速温度响应特性:温度变化会改变波导材料的弹性模量和密度,从而影响超声波的传播速度和衰减特性^[80]。通过分析波导中超声波的传播时间、频散等特征参数,可实现温度场的非接触式测量。

超声波波导测温系统主要由超声换能器模块、声学信号处理单元及固态波导结构构成核心传感组件。超声

换能器激励产生的宽频超声波经波导结构定向传输, 该波导在高温场中保持稳定的声学传导特性, 接收端换能器同步捕获调制后的声学信号。通过解析超声波传播的速度、衰减及频率特征参数, 可实现 SOC 内部温度场的动态重构, 为电堆热管理提供高空间分辨率的监测能力。

在 SOC 系统中应用超声波波导测温技术时, 波导结构优化与空间布局设计是保证测量精度的关键。采用高温稳定型陶瓷基复合材料制作的波导元件, 其优异的声阻抗匹配特性可确保超声波在气固界面的高效传播。具体布置方案主要有两种: 1) 在气体流道进出口布置波导元件, 形成分布式监测网络, 实时分析进气预热过程与气流传质特性; 2) 采用表面接触式方案, 通过高温粘接剂将波导阵列与电堆表面多点耦合, 精确测量电堆纵向温度

梯度及内部热力学场分布。

为综合多种测温技术的优势并克服单一技术的局限性, 可以融合热电偶、光纤、红外及超声传感等技术的实现温度场分布测量方案, 如图 27 所示。该方案采用多传感协同测量技术实现 SOC 电堆温度场的全域监测。系统通过三轴运动平台控制光纤光栅传感器进行匀速扫描, 实时采集流道内辐射光信号并转换为电信号; 同时利用超声波换能器阵列穿透 SOC 单元, 通过分析接收信号的波形特征获取内部温度信息。表面温度监测采用红外测温仪与分布式热电偶阵列相结合的方式, 确保温度梯度测量的空间分辨率。所有传感数据通过多通道采集系统同步数字化传输, 最终在上位机平台通过数据融合算法完成三维温度场重构, 实现电堆内外温度分布特征的精确表征。

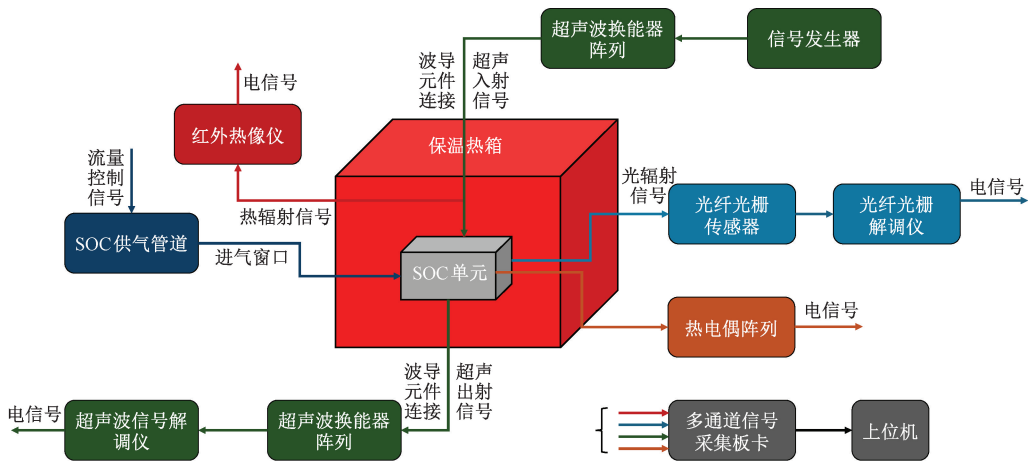


图 27 多模态融合温度测量方案流程

Fig. 27 Flow of multi-mode fusion temperature measurement scheme

多模态温度测量方案通过融合多种传感技术, 实现了 SOC 单元全温域的高精度监测。该方案整合热电偶阵列、光纤传感器、红外测温仪和超声波传感器, 构建了优势互补的测量体系: 分布式布局的光纤传感器可精准识别电堆内部温度异常; 非接触式红外测温仪及热电偶阵列可实时捕捉表面温度动态及稳态数据; 超声波传感器则穿透电堆结构实现纵向温度测量。特别地, 光纤传感的抗电磁干扰特性与超声波传感的电磁适应性相结合, 有效提升了系统在强电磁环境下的可靠性。这一融合多传感信息的测量方案为 SOC 热管理系统优化和可靠性评估提供了潜在的技术支撑。

综上所述, 声学测温技术凭借非接触式三维场重构能力, 在封闭式 SOC 内部温度监测中展现出独特潜力, 尤其适用于传感器不可达区域。然而, 复杂流场中的声速-温度耦合机制建模困难、多路径反射干扰及算法实时性不足, 制约其测量精度; 多模态融合方案虽能协同互补传感器优势, 但异构数据时空配准与热-声耦合模型的可

靠性仍需实验验证, 未来需开发自适应加权融合算法以提升鲁棒性。

4.2 SOC 高温应变测量方案

为实现 SOC 系统在高温工况下的综合性能评估, 需构建温度场-应力场多物理场协同监测架构。在精确解析三维温度场分布特征的基础上, 应重点实施高温环境下关键构件(电解质层/金属连接体/密封界面)的微观应力动态响应特性实时监测。此研究体系对于阐明材料力学性能衰减机理、热应力场梯度分布特征及其与温度场梯度的耦合关联机制具有重要理论价值。

DIC 技术为此提供了有效手段, 其通过非接触式全场应变测量可实时表征电解池组件在高温运行过程中的表面热机械行为^[81]。但是 DIC 技术仅能获取表面数据, 且 SOC 单元由于高温烧结形成的致密化结构导致内部结构不可观测。因此, 亟需发展适用于高温环境的内部应力测量技术。工业 X 射线计算机断层扫描(computed tomography, CT)及中子束扫描成像虽具有空间分辨率及

穿透率优势,但其设备购置成本高昂、辐射防护等级要求严格且难以在高温工况下持续工作,严重制约长期在线监测应用。医学CT系统虽成本较低,但受限于固定断层扫描模式和有限穿透能力,难以满足多孔电极/流道复合结构的精细成像需求。

针对现有检测技术的局限性,本文探讨一种基于高能射线成像结合数字图像相关技术的电堆高温应变无损测量方案概念。该方案采用锥束高能射线计算机断层扫描技术结合定制化高温测试热箱,通过三维动态扫描实现电堆内部结构的高分辨率可视化。锥束高能射线源包括中子束和X射线,其中中子束具备优异的材料穿透能力,可对多层堆叠的电堆组件进行无损检测,而X射线空间分辨率高,适合表层及近表面应力的精细分析,二者的互补性不仅提升了检测精度,还为材料设计、工艺优化及寿命评估提供了多维数据支撑。高温测试热箱内置精密载物平台,可在实际工况条件下完成扫描成像,所获取的高分辨率断层图像能够精确解析电堆内外微观形貌演变特征,包括材料烧结状态、界面接触形变及孔隙分布规律。通过协同DIC探测技术及融合算法有望进一步实现结构缺陷识别与热机械行为分析,实现SOC更全面的多尺度评估。

CT扫描过程中,高温测试热箱通过惰性气体环境确保电堆安全运行,并采用一体化铅屏蔽结构实现辐射防护,无需额外防辐射空间,保障操作安全便捷;扫描完成后,热箱可无缝切换至长周期工况测试,验证电堆在动态负荷下的稳定性。高能射线成像系统由射线发生器、平板探测器及运动控制模块组成,通过高能射线穿透SOC材料层,结合多角度扫描成像与数字图像处理算法,动态捕捉材料微观结构演变,解析应变分布特征,精确量化电堆在热-力耦合工况下的应变响应机制。

综上所述,基于高能射线的三维穿透成像可以实现了SOC内部应力的无损表征,其全域覆盖及局部高分辨特性为热-力耦合机制研究提供了新路径。然而,中子源稀缺性导致实验成本高昂,X射线对高密度部件穿透深度不足,且高温环境下射线探测器性能衰减等问题亟待突破;未来需发展轻量化紧凑型射线源与深度学习重建算法以提升工程适用性。

5 结 论

面向我国“双碳”目标驱动下的清洁能源转型重大战略需求,SOC作为高效绿氢制备及清洁能源发电的核心技术,其高温工况下的温度与应力分布精准表征是突破性能与可靠性瓶颈的关键。本文系统综述了SOC温度测量技术及应力测量技术的进展与挑战,重点剖析了热电偶、光纤传感、红外热成像及高能射线成像等方法的

原理、适用场景及局限性。热电偶技术虽成本低、响应快,但存在空间分辨率不足与高温稳定性差等缺陷;光纤传感凭借抗电磁干扰和高精度优势,在分布式测量中潜力显著,但其光学信号易受极端环境干扰;红外热成像技术通过非接触式动态捕捉表面温度场,但受限于发射率依赖性和内部温度不可测的瓶颈;X射线与中子成像技术在应力场重构中展现出高分辨率及穿透性优势,但需进一步突破设备依赖性与时间分辨率限制。

针对现有技术的不足,本文探讨了融合热电偶、光纤、红外及超声传感器的协同测量概念,揭示了其实现全域温度场动态重构的潜力。同时,本文还提出基于高能射线成像结合DIC技术的高温应变无损测量方案,为深入解析SOC热机械耦合机制探索了新的研究方向。总之,未来应聚焦于非侵入式、高精度、高鲁棒性传感技术的创新,深化多传感数据融合算法研究,并强化仿真与实验的协同验证,以提升测量精度与复杂工况适应性,为我国SOC技术的自主创新、产业化应用及大规模部署奠定坚实的测量学基础。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)(发改能源[2022]378号)[R]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2022.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021—2035) (FGY[2022]378)[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2022.
- [2] 彭苏萍, 杨志宾, 熊星宇, 等. 固体氧化物电池技术及其在新型电力系统中的应用前景[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 66-73.
PENG S P, YANG ZH B, XIONG X Y, et al. Solid oxide battery technology and its application prospect in new power systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 66-73.
- [3] HAUCH A, KÜNGAS R, BLENNOW P, et al. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis[J]. Science, 2020, 370: 186.
- [4] ZHANG SH H, ZHANG N, SMITH R, et al. A zero carbon route to the supply of high-temperature heat through the integration of solid oxide electrolysis cells and H₂-O₂ combustion[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112816.
- [5] 杜柯, 林凯生, 宋琛, 等. 固体氧化物燃料电池电堆及相关系统发展现状与展望[J]. 中国电机工程学

- 报, 2025, 45(10): 3877-3892.
- DU K, LIN K SH, SONG CH, et al. Development status and prospect of solid oxide fuel cell stacks and related systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(10): 3877-3892.
- [6] 位召祥, 张淑兴, 刘世学. 固体氧化物电解制氢技术现状及面临问题分析[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(35): 36-39.
- WEI ZH X, ZHANG SH X, LIU SH X. Current status and problems of hydrogen production by electrolysis of solid oxides[J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(35): 36-39.
- [7] 张俊杰, 孙旺, 高啸天, 等. 固体氧化物电解池制氢关键技术及产业化进展[J]. 化工学报, 2023, 74(12): 4749-4763.
- ZHANG J J, SUN W, GAO X T, et al. Key technologies and industrialization progress of hydrogen production by solid oxide electrolytic cell[J]. CIESC Journal, 2023, 74(12): 4749-4763.
- [8] LAHRICHI A, EI ISSMAELI Y, KALANUR S S, et al. Advancements, strategies, and prospects of solid oxide electrolysis cells (SOECs): Towards enhanced performance and large-scale sustainable hydrogen production[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 94(7): 688-715.
- [9] 王傲雪, 郭琳, 郑金玉, 等. 固体氧化物电解池材料发展现状与展望[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(3): 62-77.
- WANG AO X, GUO L, ZHENG J Y, et al. Development status and prospect of solid oxide electrolytic cell materials[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(3): 62-77.
- [10] NORMAN E A, MAESTRE V M, ORTIZ A, et al. Steam electrolysis for green hydrogen generation. State of the art and research perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 202: 114725.
- [11] 王海龙, 刘书贤, 王东, 等. 固体氧化物电解池(SOEC)共电解 H₂O 和 CO₂ 的研究进展[J]. 当代化工研究, 2023(2): 20-23.
- WANG H L, LIU SH X, WANG D, et al. Research progress of co-electrolysis of H₂O and CO₂ in solid oxide electrolytic cell (SOEC)[J]. Modern Chemical Research, 2023(2): 20-23.
- [12] ZHANG X M, SONG Y F, WANG G X, et al. Co-electrolysis of CO₂ and H₂O in high-temperature solid oxide electrolysis cells; Recent advance in cathodes[J]. Journal of Energy Chemistry, 2017, 26(5): 839-853.
- [13] YANG Y R, TONG X F, HAUCH A, et al. Study of solid oxide electrolysis cells operated in potentiostatic mode: Effect of operating temperature on durability[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 417(3): 129260.
- [14] 张文强, 于波. 高温固体氧化物电解制氢技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2020, 26(2): 212-229.
- ZHANG W Q, YU B. Current situation and prospect of hydrogen production by electrolysis with high temperature solid oxides[J]. Journal of Electrochemistry, 2020, 26(2): 212-229.
- [15] 勾匀婕, 李广东, 王振华, 等. 固体氧化物电解池技术的应用前景与挑战[J]. 石油化工高等学校学报, 2022, 35(6): 28-37.
- GOU Y J, LI G D, WANG ZH H, et al. Application prospect and challenge of solid oxide electrolytic cell technology[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2022, 35(6): 28-37.
- [16] 熊星宇, 马桂良, 吴云飞, 等. 基于热应力分析的固体氧化物燃料电池结构优化研究[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(1): 126-137.
- XIONG X Y, MA G L, WU Y F, et al. Structural optimization of solid oxide fuel cells based on thermal stress analysis[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(1): 126-137.
- [17] XU Y H, ZHANG J, TU ZH K. Numerical simulation of flow channel geometries optimization for the planar solid oxide electrolysis cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 52: 288-301.
- [18] 刘艺辉, 李世安, 魏荣强, 等. 固体氧化物燃料电池流道结构的研究进展[J]. 化学通报(中英文), 2021, 84(7): 698-703.
- LIU Y H, LI SH AN, WEI R Q, et al. Research progress on flow path structure of solid oxide fuel cells[J]. Chemistry (Chinese & English), 2021, 84(7): 698-703.
- [19] GONG CH Y, LUO X B, TU ZH K, et al. A novel flow channel design to achieve high temperature homogenization in solid oxide fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 52: 442-453.
- [20] NERAT M, JURICIC D. Modelling of anode delamination in solid oxide electrolysis cell and analysis of its effects on electrochemical performance[J].

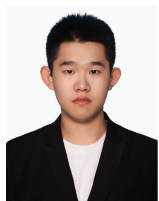
- International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(17): 8179-8189.
- [21] AGUIAR P, ADJIMAN C S, BRANDON N P. Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: Model-based steady-state performance[J]. Journal of Power Sources, 2004, 138(1-2): 120-136.
- [22] CHI Y T, YOKOO K, NAKAJIMA H, et al. Optimizing the homogeneity and efficiency of a solid oxide electrolysis cell based on multiphysics simulation and data-driven surrogate model[J]. Journal of Power Sources, 2023, 562: 232760.
- [23] LIU CH, DANG ZH, XI G. Numerical study on thermal stress of solid oxide electrolyzer cell with various flow configurations[J]. Applied Energy, 2024, 353: 122041.
- [24] GUAN W B, ZHAI H J, JIN L. Temperature measurement and distribution inside planar SOFC stacks [J]. Fuel Cells, 2012, 12(1): 24-31.
- [25] SANTONI F, SILVA MOSQUEDA D M, PUMIGLIA D, et al. In-situ study of the gas-phase composition and temperature of an intermediate-temperature solid oxide fuel cell anode surface fed by reformat natural gas[J]. Journal of Power Sources, 2017, 370(1): 36-44.
- [26] WU Y H, LIU H R, WANG Y F, et al. Spatially resolved electrochemical performance and temperature distribution of a segmented solid oxide fuel cell under various hydrogen dilution ratios and electrical loadings[J]. Journal of Power Sources, 2022, 536: 231477.
- [27] RAZBANI O, WARNHUS I, ASSADI M. Experimental investigation of temperature distribution over a planar solid oxide fuel cell[J]. Applied Energy, 2013, 105: 155-160.
- [28] YANG J J, YAN D, HUANG W, et al. Improvement on durability and thermal cycle performance for solid oxide fuel cell stack with external manifold structure [J]. Energy, 2018, 149: 903-913.
- [29] CANAVAR M, MAT A, CELIK S, et al. Investigation of temperature distribution and performance of SOFC short stack with/without machined gas channels [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(23): 10030-10036.
- [30] CELIK S, TIMURKUTLUK B, MAT M D. Measurement of the temperature distribution in a large solid oxide fuel cell short stack [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(25): 10534-10541.
- [31] RANAWEERA M, KIM J S. Cell integrated multi-junction thermocouple array for solid oxide fuel cell temperature sensing: N+1 architecture [J]. Journal of Power Sources, 2016, 315: 70-78.
- [32] GUK E, RANAWEERA M, VENKATESAN V, et al. In-situ temperature monitoring directly from cathode surface of an operating solid oxide fuel cell[J]. Applied Energy, 2020, 280: 116013.
- [33] GUK E, KIM J S, VENKATESAN V, et al. In-situ monitoring of temperature distribution in operating solid oxide fuel cell cathode using proprietary sensory techniques versus commercial thermocouples[J]. Applied Energy, 2018, 230: 551-562.
- [34] GUK E, VENKATESAN V, BABAR S, et al. Parameters and their impacts on the temperature distribution and thermal gradient of solid oxide fuel cell [J]. Applied Energy, 2019, 241: 164-173.
- [35] MAO R Z, KISHIMOTO M, SUGIHARA S, et al. Grid-shape electrical circuit assembled with resistance temperature detectors for multipoint temperature measurement of solid oxide fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2022, 530: 231293.
- [36] XIONG X Y, YANG L, WU Y F, et al. External temperature field test and leakage fault diagnosis for SOFC stacks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(7): 2788-2800.
- [37] ZHAN Y G, WU H, YANG Q Y, et al. Fiber grating sensors for high-temperature measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(4): 349-354.
- [38] 秦亚莉, 杨续来. 锂离子电池膨胀特性检测方法研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 22-33.
- QIN Y L, YANG X L. Research progress in detection methods for expansion characteristics of lithium-ion batteries[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 22-33.
- [39] 王世学, 范玉聪, 蹇季廷, 等. 固体氧化物燃料电池内温度分布测量技术进展[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(10): 2895-2920.
- WANG SH X, FAN Y C, JIAN J T, et al. Progress of temperature distribution measurement technology in solid oxide fuel cells[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(10): 2895-2920.

- [40] LIAO C R, WANG D N. Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing[J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3(2): 97-101.
- [41] BURIC M, OBODNICKI P R, YAN AI D, et al. Distributed fiber-optic sensing in a high-temperature solid-oxide fuel cell[C]. *Remote Sensing System Engineering VI*, 2016: 997708.
- [42] YAN AI D, HUANG SH, LI SH, et al. Distributed optical fiber sensors with ultrafast laser enhanced Rayleigh backscattering profiles for real-time monitoring of solid oxide fuel cell operations[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 9360.
- [43] ZAGHLOUL M A S, MASON J H, WANG M H, et al. High spatial resolution temperature profile measurements of solid-oxide fuel cells[J]. *Applied Energy*, 2021, 288: 116633.
- [44] LIANG SH ZH, BIAN Q, SCHÄFER D, et al. Determination of temperature distribution of a SOC stack using regenerated fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 645: 237120.
- [45] XIONG X Y, ZHENG B T, WU Y F, et al. A novel method of in-situ temperature distribution measurement of solid oxide fuel cell stack[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 271: 126355.
- [46] 熊星宇, 杨炼, 武鑫, 等. 一种 SOFC 电堆外部温度场测试系统及方法: CN202210771198. 8[P]. 2022-12-16.
- XIONG X Y, YANG L, WU X, et al. A SOFC external temperature field test system and method: CN 202210771198. 8[P]. 2022-12-16.
- [47] BAI H, WU X. New type of stack temperature field measurement system for SOFC[J]. *Scientific Journal of Intelligent Systems Research*, 2022, 4(4): 77-86.
- [48] 郑滨涛. SOFC 电堆内部温度场测试及故障诊断研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- ZHENG B T. Research on temperature field test and fault diagnosis in SOFC stack[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.
- [49] WUENSCHHELL J, KIM K J, BURIC M. Oxygen sensing with $\text{SrTi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\delta}$ thin films on sapphire optical fiber at extreme temperatures[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 393: 134308.
- [50] SCHULTZ A M, BROWN T D, BURIC M P, et al. High temperature fiber-optic evanescent wave hydrogen sensors using La-doped SrTiO_3 for SOFC applications[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 221: 1307-1313.
- [51] YAN AI D, CHEN R ZH, ZAGHLOUL M, et al. Sapphire fiber optical hydrogen sensors for high-temperature environments[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(1): 47-50.
- [52] 石利霞, 肖作江, 杨瑞宁, 等. 红外动态尺寸在线检测技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2005(S1): 189-190.
- SHI L X, XIAO Z J, YANG R N, et al. Research on infrared dynamic dimension online detection technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005(S1): 189-190.
- [53] 张志强, 王萍, 于旭东, 等. 高精度红外热成像测温技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(5): 10-18.
- ZHANG ZH Q, WANG P, YU X D, et al. Research on high-precision infrared thermal imaging temperature measurement technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(5): 10-18.
- [54] SUGIHARA S, IWAI H. Measurement of transient temperature distribution behavior of a planar solid oxide fuel cell: Effect of instantaneous switching of power generation and direct internal reforming[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 482: 229070.
- [55] SUGIHARA S, IWAI H. Experimental investigation of temperature distribution of planar solid oxide fuel cell: Effects of gas flow, power generation, and direct internal reforming[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(46): 25227-25239.
- [56] GUO H, IQBAL G, KANG B S. Development of an in situ surface deformation and temperature measurement technique for a solid oxide fuel cell button cell[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2010, 7(1): 55-62.
- [57] CUMMING D, ELDER R. Thermal imaging of solid oxide cells operating under electrolysis conditions[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 280: 387-392.
- [58] SAUNDERS J E A, DAVY M H. In-situ studies of gas phase composition and anode surface temperature through a model DIR-SOFC steamethane reformer at 973.15 K[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(31): 13762-13773.
- [59] POMFRET M B. Thermal imaging of solid oxide fuel cell

- anode processes [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 195(1): 257-262.
- [60] LI W L, WU SH Y, ZHU J G, et al. Real-time deformation and stress response of the planar SOFC during sintering [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, 44(4): 2242-2250.
- [61] LI W L, WU SH Y, ZHU J G, et al. Digital image correlation technique for full-field deformation of SOFC at 1 300°C: An efficient speckle pattern for porous and diffusible substrates[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 186: 108849.
- [62] MALZBENDER J, VAN GESTEL T. Residual stress assessment for thin 8YSZ electrolytes using focused ion beam milling and digital image correlation [J]. *Fuel Cells*, 2013, 13(6): 1076-1079.
- [63] 邬冠华, 熊鸿建. 中国射线检测技术现状及研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8): 1683-1695.
WU G H, XIONG H J. Current status and research advances of radiographic testing technology in China[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1683-1695.
- [64] ROBINSON J B, BROWN L D, JERVIS R, et al. Investigating the effect of thermal gradients on stress in solid oxide fuel cell anodes using combined synchrotron radiation and thermal imaging [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 288: 473-481.
- [65] ROBINSON J B, BROWN L D, JERVIS R, et al. A novel high-temperature furnace for combined in situ synchrotron X-ray diffraction and infrared thermal imaging to investigate the effects of thermal gradients upon the structure of ceramic materials[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(5): 1134-1139.
- [66] YAKABE H, BABA Y, SAKURAI T, et al. Evaluation of the residual stress for anode-supported SOFCs [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 135(1-2): 9-16.
- [67] YAKABE H, BABA Y, SAKURAI T, et al. Evaluation of residual stresses in a SOFC stack [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 131(1-2): 278-284.
- [68] SOMEKAWA T, FUJITA K, MATSUZAKI Y. Residual stress change with time of a segmented-in-series solid oxide fuel cell using an in situ X-ray stress measuring method[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 221: 64-69.
- [69] FUJITA K, SOMEKAWA T, HATAE T, et al. Residual stress and redox cycling of segmented-in-series solid oxide fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(21): 9022-9026.
- [70] AZARI K, ABDOLI H, TORABI M. Experimental investigation on potential effect of cell shape and size on the residual stress in solid oxide fuel cells[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 839673.
- [71] WOLF S, CAÑAS N A, FRIEDRICH K A. In situ X-ray diffraction and stress analysis of solid oxide fuel cells[J]. *Fuel Cells*, 2013, 13(3): 404-409.
- [72] PAPAETHIMIOU V, NIAKOLAS D K, PALOUKIS F, et al. Operando observation of nickel/ceria electrode surfaces during intermediate temperature steam electrolysis[J]. *Journal of Catalysis*, 2017, 352: 305-313.
- [73] MAKOWSKA M G, STROBL M, LAURIDSEN E M, et al. Effect of stress on NiO reduction in solid oxide fuel cells: A new application of energy resolved neutron imaging[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2015, 48(2): 401-408.
- [74] MAKOWSKA M G, KUHN L T, FRANDBSEN H L, et al. Coupling between creep and redox behavior in nickel-yttria stabilized zirconia observed in-situ by monochromatic neutron imaging [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 340: 167-175.
- [75] JANG D J, PARK H K, LEE M C. Experimental investigation on the measurement performance of high-speed ultrasonic wave thermometry in ambient-and high-temperature environments[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 242: 122484.
- [76] LIU SH, LIU SH, REN T. Ultrasonic tomography based temperature distribution measurement method[J]. *Measurement*, 2016, 94: 671-679.
- [77] JOHN M, WALTON K, KINDER D, et al. Ultrasonic measurement of temperature distributions in extreme environments: Electrical power plants testing in utility-scale steam generators [J]. *Ultrasonics*, 2024, 138: 107205.
- [78] 米小兵, 张淑仪, 张俊杰, 等. 超声波自动测温技术 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2003(4): 517-524.
MI X B, ZHANG SH Y, ZHANG J J, et al. Ultrasonic automatic temperature measurement[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2003(4): 517-524.

- [79] 宋灿, 刘石, 任思源. 基于超声波飞行时间的温度测量系统实验研究[J]. 应用声学, 2015, 34(4): 351-357.
SONG C, LIU SH, REN S Y. Experimental research on temperature measurement system based on ultrasonic time-of-flight[J]. Journal of Applied Acoustics, 2015, 34(4): 351-357.
- [80] WONG T Y, TANG Y, ZOU F X, et al. An ultra-high accuracy temperature measurement method using acoustic waveguide[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(3): 2618-2626.
- [81] 陈亚军, 孙胜洁, 季春明. 三维数字图像相关技术(3D DIC)在材料形变研究中的应用进展[J]. 航空材料学报, 2017, 37(4): 90-100.
CHEN Y J, SUN SH J, JI CH M. Application of 3D digital image correlation technology in material deformation research[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(4): 90-100.

作者简介



鲍羿夫, 2023 年于燕山大学获得学士学位, 现为华北电力大学硕士研究生, 主要研究方向为固体氧化物电解池温度分布测量技术研究。

E-mail: ysu_if19155459199@163.com

Bao Yifu received his B.Sc. degree from Yanshan University in 2023. He is currently a master's student at North China Electric Power University. His main research interest includes temperature distribution measurement techniques for solid oxide electrolysis cells.



李明举, 2019 年于重庆大学获得学士学位, 现为华北电力大学硕士研究生, 主要研究方向为固体氧化物电解池高温实验研究及衰减机理分析。

E-mail: 13220251714@163.com

Li Mingju received his B.Sc. degree from Chongqing University in 2019. He is currently a master's student at North China Electric Power University. His main research

interest includes high-temperature experimental research and attenuation mechanism analysis for solid oxide electrolysis cells.



熊星宇, 2008 年于重庆大学获得学士学位, 2010 年于英国曼彻斯特大学获得硕士学位, 2014 年于英国曼彻斯特大学获得博士学位, 现为重庆矿业大学机械与电气工程学院副教授, 主要研究方向包括氢能与燃料电池、固体氧化物燃料电池发电及电解制氢装置设计开发与集成技术、多物理场仿真等。

E-mail: xiongxingyu@hotmail.com

Xiong Xingyu received his B.Sc. degree from Chongqing University in 2008, his M.Sc. and Ph.D. degrees both from the University of Manchester, Manchester, U. K. in 2010 and 2014, respectively. He is currently an associate professor in the School of Mechanical and Electrical Engineering at China University of Mining and Technology. His main research interests include hydrogen energy and fuel cells, design, development, and integration technology of solid oxide fuel cell power generation and electrolytic hydrogen production devices, and multiphysics simulation.



钱相臣 (通信作者), 2004 年于天津理工大学获得学士学位, 2007 年于天津大学获得硕士学位, 2013 年于英国肯特大学获得博士学位, 现为华北电力大学控制与计算机工程学院副教授, 主要研究方向包括气固两相流测量技术、先进检测技术与仪器、固体氧化物电解制氢系统监测技术等。

E-mail: xqian@ncepu.edu.cn

Qian Xiangchen (Corresponding author) received his B.Sc. degree from the Tianjin University of Technology in 2004, his M.Sc. degree from Tianjin University in 2007, and his Ph.D. degree from the University of Kent, Canterbury, U. K. in 2013. He is currently an associate professor in the School of Control and Computer Engineering at North China Electric Power University. His main research interests include gas-solid two-phase flow measurement techniques, advanced instrumentation systems, and SOEC system monitoring.