



新材料研究系列丛书

STRUCTURAL DESIGN AND PERFORMANCE
STUDY OF SOLID OXIDE FUEL CELLS

固体氧化物燃料电池 结构与性能研究

肖进 著

非外借



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

STRUCTURAL DESIGN AND PERFORMANCE
STUDY OF SOLID OXIDE FUEL CELLS

固体氧化物燃料电池 结构与性能研究

肖进著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江

图书在版编目(CIP)数据

固体氧化物燃料电池结构与性能研究 / 肖进著
— 镇江 : 江苏大学出版社, 2018. 11
ISBN 978-7-5684-0970-4

I. ①固… II. ①肖… III. ①固体—氧化物—燃料电池—研究 IV. ①TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 242017 号

固体氧化物燃料电池结构与性能研究

Guti Yanghuawu Ranliao Dianchi Jiegou Sheji yu Xingneng Yanjiu

著 者/肖 进

责任编辑/徐 婷

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江市江东印刷有限责任公司

印 刷/句容市排印厂

开 本/890 mm×1 240mm 1/32

印 张/4. 625

字 数/168 千字

版 次/2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0970-4

定 价/30. 00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种可直接将化学能转换为电能的装置,因其具备全固态、高效、环境友好等优点而日益受到人们的关注。传统的高温 SOFC 对电池材料和制备技术的要求较高,导致了电池的制备成本过高,限制了 SOFC 的实际应用。因此,降低 SOFC 的工作温度至中低温范围(500 ~ 700 ℃)已成为目前 SOFC 的主要研究方向。SOFC 的中低温化很大程度上依赖于电解质的薄膜化,阳极支撑的薄膜电解质 SOFC 因其良好的结构优势而成为目前国内外 SOFC 领域研究的主流。

针对 SOFC 应用和中低温化的发展背景,本书侧重 SOFC 新型结构设计,包括阳极、电解质、阴极的材料及结构设计,分章节介绍了几种不同结构的阳极支撑的薄膜电解质 SOFC 的电池设计及制备,并对制备的电池在中低温下的性能及其影响因素进行了研究,具体研究的内容包括:

(1) 通过注浆相转化方法来制备管状阳极支撑的 YSZ 电解质薄膜 SOFC,并对制备过程中存在的一系列技术问题进行了细致研究,包括成型工艺、力学性能、烧结工艺等,成功制备了阳极支撑的管状 YSZ 电解质薄膜 SOFC,为管状 SOFC 的制备提供了新的途径和方法(第 2 章)。

(2) Sm 掺杂的 CeO_2 (SDC)在中低温下具有较高的电导率,基于 SDC 电解质的微管 SOFC 具有体积功率密度高和抗热冲击性能强等优点,本书选用 SDC 作为固体电解质材料来制备微管状 SOFC,详细探讨纺丝相转化法制备阳极支撑的微管 SOFC 的制备

工艺,测试研究了其电化学性能,并通过引入 BZCY-SDC 电子阻隔层来提高 SDC 微管电池的开路电压(第 3 章)。

(3) 质子导体是中低温 SOFC 优良的电解质材料,鉴于质子导体 BZY 烧结活性差的问题,本书利用流延相转化方法制备较好的收缩活性的平板状阳极支撑体,通过浆料涂覆的方法成功制备出致密的 BZY 电解质薄膜,对获得的阳极-电解质双层膜进行了表征,研究了烧结条件对材料微观结构的影响,并测试了单电池的电化学性能,为平板状 SOFC 的放大制备提供了一种切实可行的方法(第 4 章)。

(4) 流延法在制备平板状 SOFC 方面具有较大的经济优势。本书采用了喷雾流延的方法成功制备了质子导体电解质薄膜及阳极衬底,通过对制备工艺的探索获得了大面积制备质子平板状 SOFC 的工艺要点(第 5 章)。

(5) 中低温下 SOFC 的性能受电极极化和界面极化影响较大,性能优良的阴极材料也是中低温 SOFC 研究领域的重点,钴酸盐基阴极虽然具有很好的催化活性,但存在着热膨胀系数高、价格贵等问题,本书选取了一种无钴的 $\text{La}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_{3-\delta}$ (LBFN) 材料作为阴极材料,通过对其电导率、电池的电化学性能的表征,研究其作为一种中低温阴极材料的可能性(第 6 章)。

(6) 为了解决中低温条件下 SOFC 电解质材料问题,除了现有电解质材料的优化及新型电解质的开发以外,也可以进行电解质的结构设计,对现有电解质的结构进行合理设计,通过双层或多层电解质的有机结合,实现不同电解质间的优势互补将是 SOFC 中低温化的一个重要方式。本书对当前双层电解质在固体氧化物燃料电池中的应用进行了简单总结,为中低温 SOFC 燃料电池的设计提供了参考(第 7 章)。

本书在内容上汇聚了作者本人及曾所在课题组在中低温

SOFC 电池结构与材料设计中的部分知识总结和经验交流,研究成果具有前沿性、探索性、启发性,作者期望本书能对中低温 SOFC 的结构设计及应用开发提供理论指导和实验支持。

在本书的编写过程中,钱婧博士在 PLD 电池设计及制备方面提供了经验总结,在书稿成稿时提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。尽管在编写本书时已竭尽所能,但由于时间仓促,书中难免存在疏漏,恳谢广大专家、读者批评指正。

著 者

2018 年 7 月

目 录

- 第 1 章 固体氧化物燃料电池概述 001
 - 1.1 引言 001
 - 1.2 燃料电池 002
 - 1.3 固体氧化物燃料电池(SOFC)概述 003
 - 1.3.1 SOFC 的历史背景 004
 - 1.3.2 SOFC 的工作原理 005
 - 1.3.3 SOFC 电池性能 006
 - 1.4 固体氧化物燃料电池的关键材料 009
 - 1.4.1 SOFC 电解质材料 009
 - 1.4.2 SOFC 阳极材料 016
 - 1.4.3 SOFC 阴极材料 016
 - 1.4.4 SOFC 连接材料 020
 - 1.5 致密电解质常用制备技术 021
 - 1.6 阳极衬底的制备工艺 023
 - 1.6.1 相转化法 024
 - 1.6.2 流延法 026

- 第 2 章 YSZ 薄膜电解质管状燃料电池的设计与性能研究 028
 - 2.1 YSZ 薄膜电解质管状燃料电池简介 028
 - 2.2 YSZ 薄膜电解质管状燃料电池的制备与样品表征 030
 - 2.2.1 阳极支撑管的制备 030
 - 2.2.2 电解质和阴极膜的制备 031
 - 2.2.3 管状半电池 NiO-YSZ/YSZ 的机械强度 032
 - 2.2.4 管状单电池的电化学性能 033

- 2.3 数据处理与结果分析 034
 - 2.3.1 NiO-YSZ 阳极管状生坯的热重分析 034
 - 2.3.2 不同预烧温度对电池形貌的影响 035
 - 2.3.3 NiO-YSZ/YSZ 半电池的机械性能 037
 - 2.3.4 阳极支撑管状 YSZ 电解质薄膜单电池的性能 037
 - 2.3.5 功能层对阳极支撑管状 YSZ 电解质薄膜单电池的影响 040
- 2.4 本章结论 044

第3章 阳极支撑的 SDC 微管燃料电池的设计与性能研究 045

- 3.1 微管固体氧化物燃料电池简介 045
- 3.2 阳极支撑的 SDC 微管燃料电池的实验制备与样品表征 046
 - 3.2.1 粉体制备 046
 - 3.2.2 NiO-SDC 阳极衬底的制备 047
 - 3.2.3 微管电池电解质及阴极制备 049
 - 3.2.4 微管单电池的电化学性能表征 050
- 3.3 数据处理与结果分析 051
 - 3.3.1 微管电池的微观形貌 051
 - 3.3.2 微管电池的电池性能 053
 - 3.3.3 BZCY-SDC 电子阻隔层对于电池的影响 054
- 3.4 本章结论 058

第4章 $\text{BaZr}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ 薄膜电解质燃料电池的制备研究 059

- 4.1 $\text{BaZr}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ 薄膜电解质燃料电池简介 059
- 4.2 $\text{BaZr}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ 薄膜电解质燃料电池的实验制备与性能表征 061
 - 4.2.1 粉体的制备 061
 - 4.2.2 NiO-BZCY 阳极衬底的制备 062

- 4.2.3 BZY 电解质及阴极的制备 064
 - 4.2.4 电池的电化学测量 064
 - 4.3 数据处理与结果分析 065
 - 4.3.1 BZY 电解质粉及阴极 SSC 粉体的表征 065
 - 4.3.2 凝固浴对于阳极支撑体微观结构的影响 066
 - 4.3.3 不同烧结温度的阳极支撑的 BZY 电解质薄膜的微观形貌 067
 - 4.3.4 电解质薄膜及阳极的相结构 069
 - 4.3.5 BZY 燃料电池的电化学性能 070
 - 4.4 本章结论 073
- 第 5 章 质子陶瓷膜燃料电池的制备设计与性能研究 074**
- 5.1 质子陶瓷膜燃料电池及制备方法简介 074
 - 5.2 BZCY 基薄膜电解质燃料电池的制备设计与样品表征 076
 - 5.2.1 NiO-BZCY 阳极生坯的流延制备 076
 - 5.2.2 BZCY 电解质薄膜及阴极膜的制备 077
 - 5.2.3 电池的性能表征 078
 - 5.3 数据处理与结果分析 078
 - 5.3.1 NiO-BZCY 阳极流延生坯的热重分析 078
 - 5.3.2 不同温度烧结的阳极支撑的 BZCY 电解质薄膜的微观形貌 080
 - 5.3.3 NiO-BZCY 阳极及 BZCY 电解质薄膜的相结构分析 081
 - 5.3.4 单电池的电化学性能测量 082
 - 5.3.5 阳极支撑的 BZY 薄膜电池的流延法制备 084
 - 5.4 本章结论 086

第6章 无钴阴极材料 $\text{La}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_{3-\delta}$ 的制备与性能表征 088

6.1 SOFC 阴极材料简介 088

6.2 $\text{La}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_{3-\delta}$ 阴极材料的制备与样品表征 089

6.2.1 粉体制备 089

6.2.2 LBFN 阴极电导率及热膨胀系数的测试 090

6.2.3 对称电池及单电池的制备 090

6.3 数据处理与结果分析 091

6.3.1 LBFN 粉体的物相分析 091

6.3.2 LBFN 的电导率分析 092

6.3.3 热膨胀分析 092

6.3.4 基于 LBFN2-SDC 复合阴极的对称电池的阻抗分析 093

6.3.5 LBFN2-SDC 复合阴极制备的燃料电池性能 096

6.4 本章结论 097

第7章 双层电解质燃料电池的设计与应用 099

7.1 双层电解质燃料电池研究背景简介 099

7.2 氧化铈基/氧化锆基双层电解质燃料电池 100

7.3 氧化铈基/氧化铋基双层电解质燃料电池 101

7.4 氧化铈基/铈酸钡基双层电解质燃料电池 103

7.5 BaCeO_3 基/ BaZrO_3 基双层电解质燃料电池 104

7.6 本章结论 107

第8章 总结与展望 108

参考文献 111

第 1 章 固体氧化物燃料电池概述

1.1 引言

随着世界经济的发展,人类对能源的需求量不断递增。目前全球的工业和社会活动消耗的能量主要来自于煤、石油、天然气等化石燃料的燃烧,这种传统的能源利用方式存在两大弊端:首先,这种直接通过燃烧获得热能后再转化为机械能或电能的方式转化率只能达到 35% 左右,造成了能源的严重浪费;其次,燃烧产生的大量 CO_2 和 NO_x 、 SO_2 等温室及酸性气体会对环境造成严重的危害。为了实现能源和环境的可持续发展,人们正在大力开发太阳能、风能、地热、核能等各种新能源。在这些新能源中,太阳能发电受到占地面积过大的限制,风力和地热发电受到地域与资源的限制,核能发电的安全性也限制了其大规模应用。

燃料电池是继水电、火电、核能之后的新一代发电技术,是一种可以将燃料中的化学能不经过燃烧直接转化为电能的装置。其区别于普通电池的地方在于,燃料电池的活性物质(燃料和氧化剂)并不储存在电池内部,而是由外部供给,只要源源不断地进行活性物质的供应,燃料电池就能不间断地进行发电,无容量限制^[1]。与传统的发电技术相比,燃料电池具有一系列优点,例如能量转化率高、环境友好,模块设计结构紧凑、位置灵活,燃料来源广等^[2]。正因为有这些优点,燃料电池被认为是未来绿色发电技术中最有效的技术之一,成为世界各国竞相研究的热点^[3,4]。

1.2 燃料电池

燃料电池的历史可追溯到 1839 年, S. W. Grove 将多个简单的氢-氧燃料电池串成电源, 成功完成了对照明灯供电的演示实验。此后, 燃料电池的发展一直比较缓慢。直到 1962 年燃料电池在美国阿波罗计划的登月飞船上的正式应用才让燃料电池技术的研究重新得到重视, 使得燃料电池技术得到了快速的发展。

燃料电池经过近两个世纪的发展出现了很多种类, 按照电解质的不同可以分为碱性燃料电池(Alkaline Fuel Cell, AFC)、磷酸燃料电池(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)、质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)和固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)五种类型。不同种类的燃料电池在燃料类型、工作温度、输运离子方面都各有不同。

表 1.1 罗列了上述几种不同燃料电池的特点及构件。在几种不同的燃料电池电解质中, 固体电解质的电导率相对较低, 需要在较高的温度下运行, 但固体氧化物燃料电池的运行温度可以高于转化温度, 转化过程中需要的热量可以由自身产生的废热提供。因此, 固体氧化物燃料电池是继 PAFC 和 MCFC 之后能量转化最高的燃料电池。近年来, 固体氧化物燃料电池因其具有较普通燃料电池更加突出的优点而备受关注, 是未来最具有发展前途的燃料电池之一。

表 1.1 不同燃料电池的特点^[5,6]

燃料电池种类	磷酸盐燃料电池	碱性燃料电池	质子交换膜燃料电池	熔融碳酸盐燃料电池	固体氧化物燃料电池
电解质	H ₃ PO ₄	KOH 溶液	过氟磺酸膜	熔融的 Li ₂ O ₃ -K ₂ CO ₃	陶瓷电解 (YSZ 为例)
导电离子	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻

续表

燃料电池种类	磷酸盐燃料电池	碱性燃料电池	质子交换膜燃料电池	熔融碳酸盐燃料电池	固体氧化物燃料电池
工作温度/ ℃	205	65 ~ 220	80	650	500 ~ 1 000
阳极	Pt/C	Pt/Pd	Pt/C	Ni	Ni-YSZ
阴极	Pt/C	Pt/Au	Pt/C	Li 掺杂 NiO	Sr 掺杂的 LaMnO ₃
连接体	玻璃碳	Ni	石墨	Ni 涂覆的 无应力钢	掺杂的 LaCrO ₃
燃料	天然气、 甲醇、轻油	氢气	氢气	天然气、 甲醇、汽油	天然气、 甲醇、石油
氧化剂	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂

注:YSZ 表示钇稳定的氧化锆。

1.3 固体氧化物燃料电池(SOFC)概述

固体氧化物燃料电池(SOFC)也称陶瓷燃料电池,是一种在高温下(500 ~ 1 000 ℃)直接将化学能转化为电能的装置,是正在发展中的燃料电池中工作温度最高的一种燃料电池。

SOFC 单电池呈三明治结构,包括多孔的阳极和阴极及夹于其中的致密的电解质层。SOFC 电解质是氧化物陶瓷,这种致密的陶瓷电解质一方面作为燃料气和氧化剂的阻隔层,另一方面作为离子传输的介质。为了减少离子在电解质中的传输阻力,SOFC 一般在高温下工作(500 ~ 1 000 ℃)。阳极和阴极为多孔的结构,以便于燃料气及氧化性气体的输运。由于固体氧化物燃料电池单电池在工作条件下,只能产生 1 V 左右的电压,远不能达到实际需求,因此在实际应用中都是由多个单电池连接组装成电池堆来提供较大的输出电压和功率密度。电池堆的设计需要从性能、造价及电池堆寿命等多个方面进行考虑。目前发展的有管式设计、串联式设计、基块式设计及平板式设计等,最流行的是管式和平板式两种。

相比于其他燃料电池,SOFC 具有以下突出的优点:

(1) 由于相对高的工作温度,固体氧化物燃料电池中无须使用贵金属作为催化剂,反应活化损失小,反应快。

(2) 燃料适应范围广,氢气、一氧化碳及其他碳氢化合物都可以作为 SOFC 燃料气。这是因为高温运行可以有效地支持碳氢燃料在电池内部实现重整反应,并生成可直接进行电化学反应的氢气和一氧化碳^[7-9]。

(3) 能量转化效率高,SOFC 的效率为 50% ~ 60%;运行中还可以产生优质的余热,容易实现热电联供;实现热电联供的 SOFC 效率可高达 85%^[10]。

(4) 适用范围广,可作为静态电站、移动电源和交通工具辅助电源等^[11,12]。

(5) 全固态结构时,SOFC 中不存在液态电解质容易出现的电解质泄露及腐蚀等问题,而且易于模块化生产,安装位置灵活。

1.3.1 SOFC 的历史背景

虽然燃料电池已经存在了近两百年,但 SOFC 的出现却相对较晚。1899 年,Nernst 发现掺杂 15% 氧化钇的氧化锆(YSZ)在室温下是个绝缘体,但到了高温(600 ~ 1 000 °C)环境中却是很好的离子导体,随后固体氧化物燃料电池的概念才被首次提出^[13]。1937 年,Baur 成功地在 1 000 °C 运行了首个固体氧化物燃料电池^[14]。此后由于技术复杂性及材料加工手段的限制,SOFC 的发展一直比较缓慢。直到 20 世纪 60 年代,能源和环境等问题的愈发严重才使得 SOFC 得到进一步的重视。以美国的西屋公司(Westinghouse Electric Company)为代表^[15],通过几十年的努力研制出来圆管状的 SOFC 目前已经实现了初步商业化,这为 SOFC 的进一步发展奠定了基础。近二十年来,各国加大了对 SOFC 研究的投资。由于 SOFC 的工作原理性问题已经很明了,如何获得高稳定、高性能和低成本的各种 SOFC 组元材料并实现良好匹配及电池的安装等成为当前 SOFC 研究的重点。

1.3.2 SOFC 的工作原理

固体氧化物燃料电池与其他普通燃料电池最大区别在于 SOFC 使用的电解质是固体氧化物材料,电解质材料一般是可实现氧离子或者质子运输的纯离子导体。

电池在运行的过程中,燃料气在阳极端供给,氧化剂在阴极端供给。以基于氧离子导体电解质的 SOFC 为例,其工作原理如图 1.1 所示。

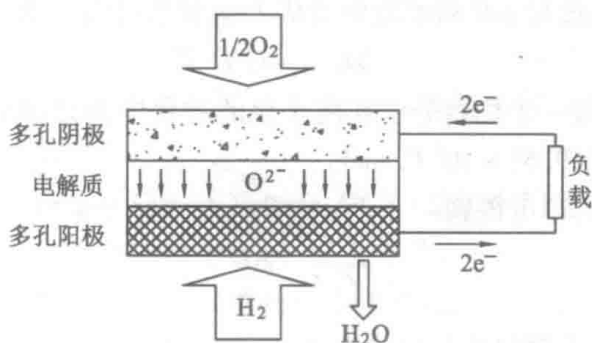


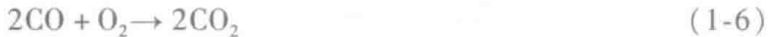
图 1.1 SOFC 的工作原理示意图(燃料气 H_2 为例)

在阴极,氧气获得来自阳极的经外电路传输的电子被还原成氧离子,氧离子在电化学势的驱动下,通过氧离子导体电解质(如 YSZ)到达阳极,在那里氧离子在阳极催化作用下与燃料气(H_2 、CO 或 CH_4)反应生成水和 CO_2 ,反应过程中释放的电子从外电路经过负载回到电池的阴极形成完整的回路,实现对负载的供电。可以看出,只要持续不断的提供燃料气和氧化剂,电池就能够不断地将化学能转变为电能。相应的化学反应可表示为



电池的总反应方程可表示为





1.3.3 SOFC 电池性能

1.3.3.1 SOFC 电池电动势

电池电动势 (Electromotive Force) 也叫电池的热力学可逆电动势, 代表着电池在可逆状态下正极和负极之间的电位差。电池的电能来自于电化学反应各组分的化学能。根据能量守恒, 吉布斯自由能的变化量 ΔG 和电池电动势 E 的关系可表示为

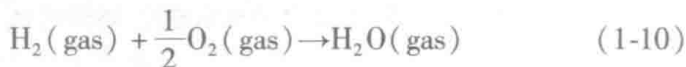
$$\Delta G = -nFE \quad (1-8)$$

式中, n 代表一个燃料分子在离子化的过程中失去的电子数; F 为法拉第常数 ($9.65 \times 10^4 \text{ C/mol}$)。

由式(1-8)可得到

$$E = -\frac{\Delta G}{nF} \quad (1-9)$$

以氢气为燃料的反应式为



则电池电动势的表达式为

$$\begin{aligned} E &= -\frac{\Delta G}{2F} = -\frac{\Delta G^0}{2F} - \frac{RT}{2F} \ln \frac{p(\text{H}_2\text{O})}{p(\text{H}_2)p(\text{O}_2)^{\frac{1}{2}}} \\ &= E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{p(\text{H}_2\text{O})}{p(\text{H}_2)p(\text{O}_2)^{\frac{1}{2}}} \\ &= E^0 + \frac{RT}{4F} \ln \frac{p(\text{H}_2)^2 p(\text{O}_2)}{p(\text{H}_2\text{O})^2} \end{aligned} \quad (1-11)$$

式(1-11)即通常所用的与温度 T 和反应物分压对应的 Nerst 方程。其中, E^0 为标准状态下的电动势, $p(\text{O}_2)$ 是阴极端的氧分压, $p(\text{H}_2)$ 和 $p(\text{H}_2\text{O})$ 分别是阳极端的燃料气中氢分压和水汽分压, R 为气体常数, T 为绝对温度。

SOFC 也可以看作一个氧浓差电池。以氧离子电解质电池为例, 在一定的温度和分压下, 氧通过离子导体从氧分压高的一侧运

输到氧分压低的一侧,进而实现化学能到电能的转化。电池的理论电动势也可以表示为

$$E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p(\text{O}_2)_c}{p(\text{O}_2)_a} \quad (1-12)$$

式中, $p(\text{O}_2)_c$ 、 $p(\text{O}_2)_a$ 分别是阴极端和阳极端的氧分压。

从式(1-12)可以看出,电池的理论电动势只与电池阳极端的氧分压、阴极端的氧分压及温度有关,与电极的本身特性并没有直接关系。在通常电池的运行中,阴极端的氧分压是一定的(如空气中的氧分压为 0.21),因此在一定的温度下,电池的电动势只是阳极端氧分压的函数,阳极端若存在少量或微量的氧气就会造成电池电动势的下降。

开路电压(Open Circuit Voltage, OCV)是指电池在开路或负载无限大的情况下电池的输出电压,也是衡量 SOFC 电池性能的另一个重要参数。纯离子导体电解质的电池在电极可随时保持平衡的高温条件下,测得的 OCV 也即电池的理论电动势 E 。然而在实际的电池 OCV 测量过程中,电池并非处于严格意义下的热力学平衡态,有可能存在密封不严及电解质致密度不够等问题,会造成一定的漏气,导致测得的 SOFC 电池的开路电压一般稍低于电池的理论电动势 E 。因此,可以通过对测量出的 OCV 值与理论值 E 比较来分析电池的气密性及电解质的致密度。

1.3.3.2 SOFC 的极化现象与电流密度 - 电压($I-V$)曲线

电池对外放电时,会产生各种电损耗。工作外电压 V 与电池电动势 E 的偏差是由极化(电极状态偏离平衡的现象)造成的,产生的极化电势叫过电势或过电位。通常电池的极化可分为三类不同的极化,分别是欧姆极化、浓差极化及活化极化。欧姆极化是由电池本身的材料电阻及接触电阻产生的;活化极化是电极反应中一步或多步速率较慢控制步骤导致的;而浓差极化是由于电极反应活性点附近的反应物的浓度低于电极气氛的本体浓度导致的。因此,燃料电池的实际电压 V 可以表达为理论电压 E 与这些极化电压的差值,即