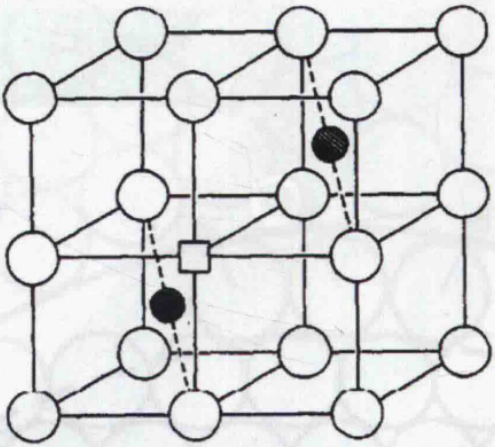
STUDY ON THE PREPARATION AND PERFORMANCE OF CeO_2 BASED SOLID ELECTROLYTES

CeO_2 基固体电解质的制备及性能研究

关丽丽◎著



燕山大学出版社
YANSHAN UNIVERSITY PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

图书在版编目（CIP）数据

CeO_2 基固体电解质的制备及性能研究 / 关丽丽著 . — 秦皇岛：燕山大学出版社，2022.6

ISBN 978-7-5761-0354-0

Ⅰ . ① C… Ⅱ . ①关 … Ⅲ . ①氧化铈－固体电解质电池－研究 Ⅳ . ① TM911.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 080686 号

CeO_2 基固体电解质的制备及性能研究

关丽丽 著

出 版 人：陈 玉
责任编辑：方志强
责任印制：吴 波
装帧设计：方志强
出版发行：燕山大学出版社 YANSHAN UNIVERSITY PRESS
地 址：河北省秦皇岛市河北大街西段 438 号
邮政编码：066004
电 话：0335-8387555
印 刷：英格拉姆印刷(固安)有限公司
经 销：全国新华书店

开 本：170mm×240mm 1/16
印 张：10.5
版 次：2022 年 6 月第 1 版
印 次：2022 年 6 月第 1 次印刷
书 号：ISBN 978-7-5761-0354-0
字 数：146 千字
定 价：48.00 元

版权所有 侵权必究
如发生印刷、装订质量问题，读者可与出版社联系调换
联系电话：0335-8387718

目 录

第 1 章 绪论 1

1.1 燃料电池 1

1.2 固体氧化物燃料电池 5

1.2.1 固体氧化物燃料电池的工作原理 5

1.2.2 固体氧化物燃料电池的组成及材料 6

1.2.3 固体氧化物燃料电池的结构类型 8

1.3 固体氧化物燃料电池电解质 10

1.3.1 ZrO_2 基固体电解质 11

1.3.2 Bi_2O_3 基固体电解质 12

1.3.3 $LaGaO_3$ 基固体电解质 13

1.3.4 CeO_2 基固体电解质 14

1.4 CeO_2 基电解质的研究进展 17

1.4.1 常压烧结温度的降低 17

1.4.2 外场辅助烧结技术 18

1.4.3 氧离子传导性能的改善 21

参考文献 23

第 2 章 掺杂 CeO_2 电解质的制备及常见研究方法 33

2.1 粉体合成方法 33

2.1.1 固相法 33

2.1.2 低温燃烧合成法 34

2.1.3 水热法 34
2.1.4 溶胶-凝胶法 35
2.1.5 共沉淀法 36
2.2 成型与烧结 37
2.3 物理特性表征 38
2.3.1 晶体结构分析 38
2.3.2 粒度及微观形貌分析 41
2.4 收缩性能与相对密度测试 44
2.5 交流阻抗测试 45
参考文献 47
第 3 章 掺杂氧化铈的烧结过程研究 49
3.1 烧结与传质 49
3.1.1 烧结模型的研究进展 52
3.1.2 晶粒生长过程 53
3.2 掺杂氧化铈的致密化过程研究 54
3.2.1 掺杂剂含量对致密化过程的影响 54
3.2.2 加热速率对收缩行为的影响 58
3.3 掺杂氧化铈的致密活化能 60
3.3.1 Arrhenius 法研究活化能 61
3.3.2 主烧结曲线法研究活化能 63
3.4 相对致密度与电解质微观形貌分析 70
3.5 晶粒生长机制研究 74
参考文献 78
第 4 章 掺杂氧化铈的低温闪烧行为研究 84
4.1 闪烧技术概述 84

4.1.1 闪烧技术应用领域 86
4.1.2 闪烧可能的机理 88
4.2 掺杂氧化铈的闪烧参数研究 89
4.2.1 电场强度对闪烧温度的影响 89
4.2.2 样品电导率分析 91
4.2.3 阶梯增流闪烧 95
4.2.4 闪烧过程中收缩性能的研究 98
4.3 闪烧样品的微观形貌分析 100
4.3.1 电场强度对晶粒尺寸的影响 100
4.3.2 电流密度对微观形貌的影响 103
4.4 电解质闪烧机理分析 104
4.4.1 黑体辐射理论研究试样温度 105
4.4.2 温度分布及对应的表面微观结构 108
4.5 室温下 Sm_2O_3 掺杂 CeO_2 的石墨辅助闪烧 111
参考文献 118
第 5 章 掺杂氧化铈的离子传导机理研究 124
5.1 氧离子导体传导机理 125
5.2 晶粒尺寸与晶界效应 127
5.3 掺杂氧化铈的电性能研究 130
5.3.1 阻抗谱随测试温度的变化 130
5.3.2 迁移焓与解离焓的研究 133
5.4 烧结温度对电解质电性能的影响 134
5.4.1 烧结温度对总离子电导的影响 134
5.4.2 烧结温度对晶界电导的影响 136
5.4.3 晶粒与晶界活化能的研究 140

需要全本请访问 www.ertongbook.com

5.4.4 烧结温度对氧空位浓度分布的影响 143
5.5 掺杂特性对电解质离子传导的影响 150
5.5.1 离子传导活化能的研究 150
5.5.2 平均结合能与弹性应变的研究 152
参考文献 155

第 1 章　绪论

能源是人类活动的物质基础，是国民经济的命脉，与我们的生活息息相关，也是衡量国家综合国力和人民生活水平的重要指标。随着我国经济的快速发展，人均能耗与日俱增，能源的供求矛盾越发突出，作为不可再生的化石能源将逐渐被消耗殆尽，由此引发的能源危机问题已严重威胁到国家的发展和战略安全。此外，使用传统化石能源带来的环境问题也亟待解决，全球气候变化对人类构成重大威胁，同时碳排放过量也与社会经济，甚至政治博弈都有着紧密的联系。因此，开发环保、高效、安全、储量丰富的新型能源是当前亟须解决的问题，也是时代发展的必然要求。

近些年来，燃料电池技术应运而生，其以高效、清洁、燃料灵活性、可持续性使用和无噪声等诸多优点得到科研人员的广泛关注与研究。固体氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cell, SOFC）属于第三代燃料电池，可直接将氢气、甲醇、烃类等燃料的化学能转化为电能，发电过程不经过燃烧反应。因其不受卡诺循环的限制，故转化率较高，可达 65%以上，是一种高效的绿色能源转化装置[1-2]。固体电解质作为 SOFC 的关键组件，在很大程度上决定了电池的性能。

1.1 燃料电池

燃料电池（FC）是一种将燃料的化学能直接转化为电能的发电装置，具有能量转化效率高（一次发电效率为 40%~60%，系统热电联供效率为

60%~80%）、环境友好、能长时间连续工作、安全性高等优点。1839 年，英国科学家 William Robert Grove 使用铂电极将硫酸电解，生成了氢气和氧气，同时，在 Pt 的催化下，氢气和氧气发生电化学反应，并随之产生了电流，这是第一个气体电池装置，也被认为是世界上第一个燃料电池。1889 年，Langer C.与 Mond L.在这些研究的基础上，提出了“燃料电池理论”，这是“燃料电池”一词第一次被提及。1965 年，燃料电池首次成功为美国双子星宇宙飞船提供电能。近年来，燃料电池也在快速发展并在实际中得到了应用。

燃料电池种类很多，但其电池结构一般都由阳极、阴极、电解质和外部电路组成。工作状态下，燃料电池的阴极侧发生的是氧化剂的还原反应（如 O_2 被还原成 O^{2-}）同时释放出电子，电子通过外电路传至阳极侧；而阳极侧发生燃料气的氧化反应（如 H_2 被氧化生成 H_2O），并从外电路中得到电子。

燃料电池按电解质材料的不同，可以划分为碱性燃料电池（AFC）、磷酸燃料电池（PAFC）、熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）、质子交换膜燃料电池（PEMFC）和固体氧化物燃料电池（SOFC）。

（1）碱性燃料电池（AFC）

碱性燃料电池是最早研发并得以应用的燃料电池。该类电池以强碱（如 KOH）作为电解质，在低温 AFC（低于 120 ℃）中，使用 KOH 溶液的质量百分比含量为 30%~45%；高温 AFC（约 260 ℃）中，KOH 溶液的质量百分比含量可达 85%。电池能量转化效率可达 70%，工作电压为 0.5~0.9V。与酸性电解液相比，碱性电解质中阴极的活性过电位较低，不仅可以使用低载量的贵金属催化，同时也可以使用非贵金属作为电极催化剂。

AFC 可以在低温下快速启动，并迅速达到额定负荷，同时电池的本体材料选择广泛，电池造价较低。因此，碱性燃料电池作为高效且价格低廉的成熟技术，在便携式电源和交通工具用动力电源方面，具有较大的发展和应用前景。然而，由于 AFC 以空气作为氧化剂，空气中的 CO_2 会毒害

碱性电解质生成碳酸根离子，对电池的效率和使用寿命造成影响，因此碱性燃料电池系统在运行时一般需要配置 CO_2 脱除装置。

（2）磷酸燃料电池（PAFC）

磷酸燃料电池（PAFC）是商业实用化最高的中低温电池。其单体电池由隔板、阳极气室、阴极气室、电解质层、冷却板组成。磷酸作为其电解质材料不易挥发，即使燃料气体掺入 CO 也不易中毒，允许的 CO 质量分数上限为 0.5%。当然磷酸需要固定在多孔隔膜材料中，依靠毛细作用吸附电解质，因此，电解质隔膜要求绝缘，防止阴极/阳极气体相通（气体交叉导致性能下降），还要有良好的导热性及一定的机械强度，能在 200 ℃左右保持稳定工作。

（3）熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）

熔融碳酸盐燃料电池是一种典型的高温燃料电池，工作温度范围在 600 ~700℃，具有集成度高、成本相对低、可用非贵重金属作为催化剂的优势，燃料适应性广且能与其他动力系统互补。MCFC 的电解质是一种固定在 $LiO\text{-}AlO_2$ 基体中的碱性碳酸盐——Li_2CO_3 和 K_2CO_3 的混合物，在 MCFC 工作温度下呈熔融状态。阳极通常由一种镍/铬合金构成，阴极由经过锂化的镍氧化物组成。电池运行时，阳极的 CO_3^{2-} 与作为燃料的 H_2 反应，生成 CO_2，并释放电子，通过外部循环至阴极并与 O_2 反应生成 CO_3^{2-}，而作为电荷载体的 CO_3^{2-} 穿过电解质又进入阳极开始新的循环。具体的反应过程如下所示。

阴极：

$$O_2+2CO_2+4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-} \tag{1-1}$$

阳极：

$$2H_2+2CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2+2H_2O+4e^- \tag{1-2}$$

总反应：

$$O_2+2H_2 \rightarrow 2H_2O \tag{1-3}$$

由反应式可知，MCFC 的导电离子为 CO_3^{2-}，CO_2在阴极作为反应气体消耗，在阳极又重新生成。为使 MCFC 连续稳定地工作，除了需要转移电化学反应余热使电池内部温度保持稳定，还应将阳极产生的 CO_2转移到阴极。

（4）质子交换膜燃料电池（PEMFC）

质子交换膜燃料电池是以固态质子交换膜作为电解质的燃料电池。自从杜邦公司获得该技术的突破以后，该类电池成为最优应用前景的燃料电池之一。目前的质子交换膜主要指 Nafion 膜，该膜在运行过程中只允许 H_2O 与 H^+通过，拥有良好的离子电导率和化学-机械性能。在其两侧分别喷涂阴、阳极催化剂后，热压气体扩散层以得到其核心部件——膜电极（MEA）。PEMFC 的过程转化效率高，环保无污染，且噪声低。然而，阴极的氧还原反应的动力学电流比发生在阳极的氢氧化过程慢了 5~6 个数量级，且两侧均需要昂贵的铂基催化剂来驱动反应，以顺利达到实用条件，因此其成本较高。目前，PEMFC 的研究主要集中于低铂催化剂及非贵金属催化剂的开发。

（5）固体氧化物燃料电池（SOFC）

固体氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cell，SOFC）这一概念最初是在 1905 年被 Haber 提出，随后被广泛研究。因其具有陶瓷结构的特点，SOFC 又被称为陶瓷燃料电池（Ceramic Fuel Cells）。SOFC 不受卡诺循环的限制，故转化率可高达 65%以上，进行热电联供时能取得更高的能量转换效率。电池具有全固态的结构，适合模块化设计，大小易控，应用范围广泛，可组装成大型发电装置。SOFC 的传统工作温度为 800~1000 ℃，目前，随着低温电解质的出现，部分电池的工作温度可低至约 500 ℃。此外，SOFC 的运行温度高于大部分其他类型的燃料电池，燃料的氧化活性较高，能快速达到热力学平衡状态，因而电极材料无须使用贵金属，并可直接使用水煤气、天然气、碳氢化合物和固体碳等多种类型的燃料，且无须经过外部燃气重整。然而该电池由于运行环境对各部分材料的要求较为

严格，启动升温和降温耗时较长，限制了其在某些方面的应用。

1.2 固体氧化物燃料电池

如上所述，SOFC 是在中高温条件下可直接将化学能转化成电能的装置，几乎不向空气中排放硫氧化物（SO_x）与氮氧化物（NO_x），是一种清洁无污染的技术。由于可以将氢气、烃类等多种物质作为燃料，燃料的适应性较高。同时 SOFC 的结构较为简单，全固态的组件使得电池更易于操控[3-6]。电池中阴极和阳极仅仅作为化学反应的场所以及载流子的传输通道，因此能够维持较长寿命[7-10]。

1.2.1 固体氧化物燃料电池的工作原理

SOFC 为全固态结构，单体电池的关键组件由多孔阳极、电解质、多孔阴极组成。多孔阴极由能将氧气分子吸附在材料表面并具有解离氧的陶瓷材料制备而成。在电池工作时，管道中通入的氧化性物质在多孔阴极表面被还原，将吸附在电极表面的氧化性物质分解为 O^{2-}；电解质处于 SOFC 的中间位置，包括质子导体型与氧离子导体型两种，其中氧离子导体型电解质（如摩尔分数为 8%的钇稳定的 ZrO_2，记为 8YSZ）的作用是传导氧离子，并分离空气、燃料；多孔阳极由具备催化活性的金属或金属陶瓷材料制备而成。

电池工作时的具体反应过程如下：燃料气体从阳极进入，并吸附到阳极表面，之后通过多孔阳极到达阳极/电解质三相界面，与阴极反应生成的 O^{2-}发生氧化反应放出电子；氧气从阴极进入并吸附到阴极表面，之后通过多孔阴极到达阴极/电解质三相界面，并接收外电路传递来的电子生成 O^{2-}，O^{2-}经由电解质传递到阴极，与燃料气体如 H_2 反应生成 H_2O，放出电子，形成电流。图 1-1 所示为 SOFC 的工作原理图。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

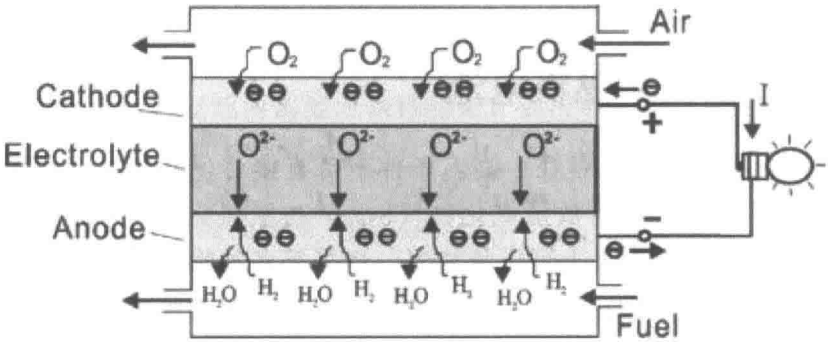


图 1-1 SOFC 的工作原理图[11]

SOFC 的阴极及阳极处发生的电化学反应方程式为[12]：

阴极反应：

$$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-} \quad (1\text{-}4)$$

阳极反应：

$$2O^{2-} + 2H_2 \rightarrow 2H_2O + 4e^- \quad (1\text{-}5)$$

1.2.2 固体氧化物燃料电池的组成及材料

在 SOFC 中，电解质材料、多孔电极（阴极和阳极）、密封材料、连接体材料是组成电池或电堆的主要部件，在 SOFC 工作情况下，不同组分发挥不同的作用，所以各组分需要具备不同的优异性能[13-15]。

（1）电解质

电解质的主要作用是传导离子和阻隔阴/阳两极，其性能的好坏直接决定着 SOFC 的工作温度和功率密度，是整个电池的核心部件。目前，氧离子导体型固体电解质材料主要可以分为四类：ZrO_2基电解质、CeO_2基电解质、$LaGaO_3$基电解质和 Bi_2O_3基电解质。

（2）阳极

SOFC 运行过程中，阳极一侧发生燃料的电化学氧化反应，因此阳极

材料需要能够对各种燃料的氧化反应具有良好的催化活性，进而减小阳极燃料氧化过程中的活化极化。此外，阳极应具备较高的电子电导率和离子电导率，以减小阳极中电子传导引起的欧姆极化，提高阳极反应速率。电极也应具备良好的孔结构及适合的孔隙率，能够保证燃料气快速扩散到发生电化学反应的三相界面，并将反应产物快速地传递出去，以减小阳极侧的浓差极化。同时，应与电解质等周围电化学部件间具有相似的热膨胀系数及良好的化学相容性，避免发生分层、脱落或断裂等现象，在燃料电池较高的工作温度及强还原条件下，具备良好的物理化学稳定性。目前，常用的燃料电池阳极材料分为 Ni 基、Cu 基及钙钛矿阳极，其中 Ni 基材料应用较为广泛，例如，现阶段的 SOFC 电堆主要采用 Ni-YSZ、Ni-GDC 这类复合材料作为阳极使用。

（3）阴极

理想的 SOFC 阴极材料的主要特点为：对氧还原反应具有高催化活性，具有高电子电导率和一定的离子电导率以扩大三相反应界面（TPB），具有合适的孔隙率和较大的比表面积，在氧化气氛中具有较高的化学稳定性，与电解质化学相容性良好、热膨胀系数相近，具有较高的氧表面交换系数和体扩散系数等。

目前较为常用的阴极材料以稳定的钙钛矿结构为主，包括 $La_xSr_{1-x}Mn_yO_{3-\delta}$（LSM）、$La_xSr_{1-x}Co_yO_{3-\delta}$（LSC）和 $La_xSr_{1-x}Co_yFe_{1-y}O_{3-\delta}$（LSCF）等[16]。

（4）密封材料

SOFC 电堆中主要漏气途径有：单电池与金属连接体之间、电堆的夹具与堆芯之间等。为避免燃料气体与空气混合发生爆炸，密封材料在电堆启动过程、保温发电过程、多次启动过程等工作状态均应保持极低的漏气率。此外，密封材料与电堆中其他组件（单电池电极和金属连接体）间也应保持良好的化学相容性，材料组分与电堆相邻部件不发生反应，避免界面处发生化学反应导致密封失效，具备对还原性气体 H_2 的抗腐蚀性能力。

同时，需与电堆中的金属连接体和单电池保持相近的热膨胀系数，避免在其界面处开裂、变形。

（5）连接体材料

SOFC 电堆用连接体材料必须满足以下三个基本条件：首先，应具有高温导电性，即较高的电子电导，减小欧姆损失，从而使电堆的输出电压不会因内阻过大而明显衰减，800 ℃时普遍接受的连接体电导率不低于 1 $S \cdot cm^{-1}$，该数值比同温度下的电解质材料 YSZ 的电导率（0.02 $S \cdot cm^{-1}$）高了 2 个数量级。此外，在 SOFC 电堆长期运行过程中，连接体的导电性不能因为结构变化、高温氧化等问题出现明显的衰减。其次，连接体在氧化和还原气氛中应具有较好的稳定性，不会被氧化腐蚀，也不与还原气体反应，避免产生化学腐蚀而造成化学组成或相结构的改变。同时，还需满足与 SOFC 其他组件的匹配和相容，即热膨胀系数与 SOFC 的电解质和电极材料的热膨胀系数越接近越好，从而最大限度地降低热循环所产生的应力。由于连接体直接和电池阴极、阳极、密封材料相接触，因此在工作过程中不能与这些部件发生反应或者内部扩散。此外，为了满足 SOFC 电堆商业化的需求，连接体还应具备良好的机械加工性，成本低廉，良好的抗硫化、抗积碳的性能。

1.2.3 固体氧化物燃料电池的结构类型

在实际应用中，为了获得所需电压和输出功率，需将多个 SOFC 单体电池组合装配成电池堆，因此 SOFC 单电池结构应具有性能可靠、便于放大以及方便维修等特点。根据结构类型的不同，固体氧化物燃料电池大体可分为四类，分别为平板式 SOFC、管式 SOFC、扁管式 SOFC 和瓦楞式 SOFC。结构的不同也造成了这四种 SOFC 各自的优缺点及独特的制备方法。经过长期的发展和优化，平板式和管式 SOFC 成为目前各国应用及研发的重点。

（1）平板式 SOFC

平板式 SOFC 电池由阴极、固体电解质、阳极烧结而形成“三合一”的三明治结构（Positive Electrolyte Negative Plate，PEN）单元，通过连接体的串联组成电池堆。气体需通过连接体进入氧化气室与还原气室，因此需在连接体材料的两侧设计导气沟槽，空气和燃料气分别通过对应阴极和阳极侧连接体的导气通道进入相应气室，随后扩散到电极表面。为了确保氧化气与燃料气在电池工作过程中保持隔离状态，同时氧化气室与还原气室可以保持一定的气体压力，需使用耐高温密封材料将连接体与 PEN 结构密封在一起，传统的密封材料为微晶玻璃材料。图 1-2 为平板式 SOFC 结构示意图。

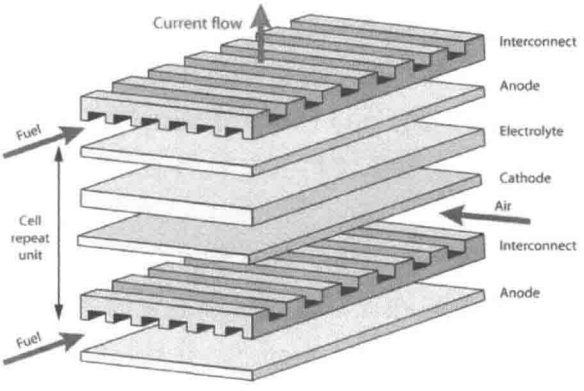


图 1-2 平板式 SOFC 结构示意图[17]

（2）管式 SOFC

管式 SOFC 是固体氧化物燃料电池最初采用的结构构型，同时也是最为接近实用化的 SOFC 构型。管式 SOFC 的管径对燃料电池堆的功率密度和启动时间有显著的影响。第一代管式 SOFC 的典型代表是早期美国 Westinghouse 公司设计的阴极支撑管式 SOFC。Westinghouse 公司在单电池的制备、电池堆的组装和运行方面技术成熟，并进行了大量的单电池和电池堆组长期工作运行试验，其管式 SOFC 电池堆性能测试维持长达 8 年，但是，高昂的制备成本限制了 Westinghouse 公司的管式 SOFC 的商

业化推广。第二代管式 SOFC 主要采用了挤出成型和浆料涂覆工艺制备，降低了成本。美国马萨诸塞州 Westwood 的 Acumentrics 公司采用低成本的浆料涂敷技术，制备了阳极支撑型管式 SOFC，单管直径为 15 mm 和 22 mm。第三代管式 SOFC 为微管式，管径由厘米级缩小至微米级，同时兼具管式 SOFC 和平板式 SOFC 的优点。英国伯明翰大学的 Kendall 教授率先提出了微管式 SOFC 的概念。由 Kendall 教授创立的全球第一家微管 SOFC 企业——英国 Adelan 有限公司的管式 SOFC 便携式电源，工作温度可在不到 10 s 的时间从室温升到 800 ℃。

1.3 固体氧化物燃料电池电解质

电解质是 SOFC 的核心组件，它的主要作用是在电极间传导氧离子，同时隔绝燃料气和氧气，因此电解质材料的性能决定了电池的性能[18-20]。

作为能够实际应用的电解质材料，要求满足如下特性：

（1）高致密度。为了避免燃料气与氧气的直接反应，电解质材料必须易于制备成致密的薄膜。

（2）高的离子电导率。SOFC 中的固体电解质主要功能是传输离子电荷，因此要求电解质材料在双重气氛下和很宽的氧分压范围内均具有较高的离子电导率，一般要大于 10^{-2} $S \cdot cm^{-1}$，并且长时间保持稳定。

（3）高的离子迁移数。良好的电解质材料应为正离子或负离子单方向导电，而不应该在电解质内部出现电子导电。为了避免降低电池电势，必须有较高的离子迁移数。

（4）良好的结构稳定性。在氧化和还原气氛下，以及从室温到制备/操作温度的范围内，电解质材料必须具备刚性骨架稳定和外形尺寸稳定的特点。

（5）良好的化学稳定性。在双重气氛下和从室温到制备/操作温度范围内，电解质都应该与其他电池元件之间具有良好的化学相容性，不发生界面反应。

（6）热膨胀匹配性。电解质与其他电池元件之间应保证热膨胀系数

的匹配，避免开裂、脱落以及接触不良。

固体氧化物燃料电池的氧离子导体型电解质中，研究最早且应用最为广泛的是 Y_2O_3 稳定的 ZrO_2（YSZ），此外萤石型 CeO_2 基电解质、Bi_2O_3 基电解质和钙钛矿型 $LaGaO_3$ 基电解质等中低温固体材料也受到关注[21]。图 1-3 列出了几种典型固体电解质的 Arrhenius 图。最近，研究者还发现了许多其他结构的材料也具有良好的氧离子传导性能，如钙铁石和六方晶系的氧化物。下面分别对上述四大类型电解质进行简要的描述。

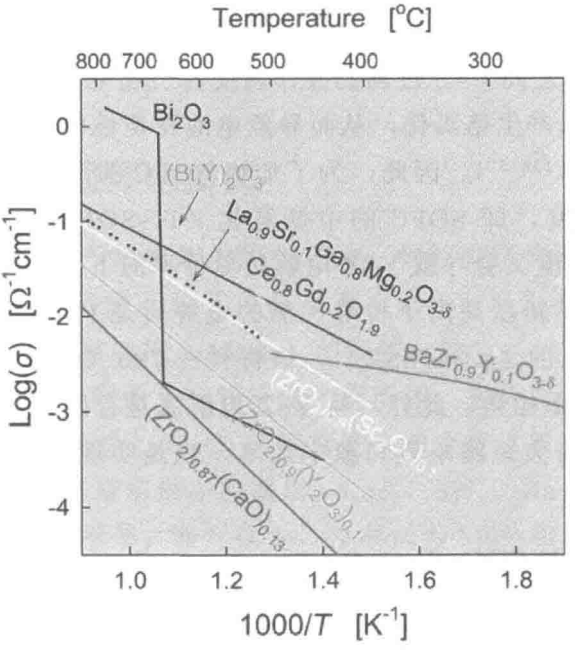


图 1-3 几种典型固体电解质的电导率[22]

1.3.1 ZrO_2 基固体电解质

ZrO_2 基固体电解质是最早应用于 SOFC 的一种氧离子导体，由于其优良的机械性能、化学性能、导电性，易薄膜化以及成本低廉等优点，得到了广泛的研究与应用。纯的 ZrO_2 有三种晶型，常温下为单斜相，1170 ℃

需要全本请访问 www.ertongbook.com