

前 言

陶瓷是中华文明的重要象征与物质载体，当传统陶瓷工艺与现代电化学技术相结合，陶瓷燃料电池应运而生。这一具有革命意义的能源转换技术，在新能源时代展现出了崭新的生命力。陶瓷燃料电池亦称固体氧化物燃料电池，该技术具有燃料适用性广、能量转换效率高、全固态结构稳定、可模块化组装等突出优点，在我国新型能源体系建设和实现“双碳”目标中扮演着关键角色。尽管如此，从技术研发走向规模化应用仍面临诸多挑战，如材料在长期运行中的稳定性、关键部件的可靠性及系统的集成优化等，这些问题的解决亟须学术界与产业界的紧密协作与持续攻关。本书的撰写，旨在系统梳理陶瓷燃料电池的基础理论与技术进展，为推动其科研深化与产业化进程提供有力的参考。

本书共 10 章，前 6 章立足基础知识，系统分析氢能源发展的背景与战略意义，深入阐述陶瓷燃料电池的基本电化学原理，继而对燃料电池三大核心组件（电解质、阴极、阳极）的材料科学基础进行详细剖析，强调原理与实例分析相结合，旨在帮助读者构建系统而扎实的理论体系，在此基础上，重点探讨电堆中的连接体与封接材料，这两类关键组件也是决定可靠性与寿命的关键。后 4 章聚焦前沿进展与应用：第 7 章论述质子陶瓷燃料电池这一新兴方向；第 8 章介绍金属支撑固体氧化物燃料电池技术，该技术有效突破了传统陶瓷结构脆性高、抗热震性不足的限制；第 9 章阐述可逆运行模式下的电池工作特性与关键材料需求，展现其在可再生能源储能与电网调峰领域的应用潜力；第 10 章则将视野拓展到产业全景，综合分析全球技术发展格局、产业链现状，并结合典型示范案例，剖析产业化面临的机遇与挑战。

陶瓷燃料电池技术正处于产业化的关键节点。我国在陶瓷材料领域的深厚积淀、在氢能战略上的前瞻布局、在新能源市场的巨大需求，为这一技术的发展提供了得天独厚的条件。希望本书的出版能够激发更多青年学者投身这一领域，推动更多创新成果走出实验室、走向市场。

本书凝聚了作者团队二十年的研究心得，也汇集了国内外同行的智慧结晶。在此要特别感谢国家重点研发计划、国家自然科学基金、基础学科和交叉学科突破计划的持续支持，感谢中国矿业大学（北京）、怀柔实验室提供的科研平台。感谢彭苏萍院士的领导与支持，感谢赵海雷、雷泽、熊星宇、葛奔、胡亮、卜云飞、肖国萍、崔大安、武鑫、钱相臣、张瑞云等老师的大力协助，感谢第 2 章初稿撰

写者王浩然，第3章初稿撰写者郑紫微、第4章初稿撰写者张盼盼、第5章初稿撰写者金奕千、第6章初稿撰写者郭梦媛、第7章初稿撰写者景俊萌、第8章初稿撰写者卜云飞、第9章初稿撰写者常杰善、第10章初稿撰写者王目周，感谢张敏等的辛苦检查，感谢评审专家的宝贵意见和出版社编辑的精心打磨。

尽管我们撰写本书力求严谨，但书中难免有不足之处，恳请广大读者予以批评指正。

杨志宾

2026年1月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 氢能与燃料电池	1
1.2 燃料电池类型	2
1.2.1 燃料电池简介	2
1.2.2 燃料电池分类	3
1.3 陶瓷燃料电池原理	4
1.4 陶瓷燃料电池基本概念	5
1.4.1 理论电动势	5
1.4.2 活化极化	6
1.4.3 欧姆极化	7
1.4.4 浓差极化	7
1.5 陶瓷燃料电池结构类型	8
1.6 陶瓷燃料电池特点及应用	8
1.7 本章小结	9
参考文献	10
第 2 章 电解质	12
2.1 电解质的基本要求	12
2.1.1 物理性能要求	12
2.1.2 电化学性能要求	12
2.1.3 热力学稳定性要求	13
2.1.4 机械性能要求	13
2.1.5 化学相容性要求	13
2.1.6 经济性要求	14
2.1.7 低温化发展需求	14
2.2 电解质类型	14
2.2.1 氧化锆基电解质	14
2.2.2 氧化铈基电解质	16
2.2.3 LaGaO_3 基电解质	16
2.2.4 质子导体电解质	17

2.2.5	高熵电解质	17
2.3	电解质制备工艺	19
2.3.1	电解质粉体制备方法	19
2.3.2	电解质薄膜成型工艺	20
2.4	电解质的增韧技术	23
2.5	电解质发展展望	25
2.5.1	新型电解质材料的开发	25
2.5.2	电解质薄膜化技术	25
2.5.3	成本控制策略	25
2.6	本章小结	26
	参考文献	26
第3章	阴极	29
3.1	阴极概述	29
3.1.1	阴极特性	29
3.1.2	阴极反应过程	30
3.2	阴极材料分类	31
3.2.1	LnMnO ₃ 基钙钛矿	32
3.2.2	LnCoO ₃ 基钙钛矿	32
3.2.3	LnFeO ₃ 基钙钛矿	32
3.2.4	BCFN基钙钛矿	33
3.2.5	高熵阴极	33
3.2.6	复合阴极	33
3.3	阴极基本性能评价方法	34
3.3.1	微观结构	34
3.3.2	电导率	35
3.3.3	电化学性能	36
3.4	阴极工况耐侵蚀性能	37
3.4.1	阴极抗水侵蚀性能	37
3.4.2	阴极抗二氧化碳侵蚀性能	38
3.4.3	阴极抗铬侵蚀性能	38
3.5	阴极界面改性	39
3.5.1	阴极界面结构类型	39
3.5.2	阴极界面改性技术	40
3.5.3	阴极界面改性对电池性能的影响	42
3.6	阴极发展展望	44

3.7 本章小结	45
参考文献	46
第4章 阳极	52
4.1 阳极的基本要求	52
4.2 阳极材料分类	52
4.2.1 镍金属陶瓷	52
4.2.2 铜基氧化物	53
4.2.3 钙钛矿材料	53
4.3 阳极基本性能评价方法	54
4.3.1 微观结构	54
4.3.2 电导率	55
4.3.3 电化学性能	55
4.3.4 耐硫中毒性能	56
4.3.5 抗积碳性能	56
4.4 抗积碳阳极控制策略及结构	57
4.4.1 阳极燃料	57
4.4.2 阳极积碳机理	58
4.4.3 抗积碳阳极控制策略	59
4.4.4 阳极催化层	60
4.5 阳极的表界面改性技术	64
4.5.1 溶液浸渍	64
4.5.2 钙钛矿阳极的原位析出	66
4.6 阳极发展展望	68
4.7 本章小结	69
参考文献	69
第5章 连接体材料及涂层技术	76
5.1 连接体	76
5.1.1 连接体基本要求	76
5.1.2 钙钛矿陶瓷连接体材料	79
5.1.3 金属连接体材料	84
5.2 涂层	94
5.2.1 涂层材料基本要求	94
5.2.2 涂层制备工艺	95
5.2.3 抗氧化涂层评测方法	99
5.2.4 钙钛矿连接体涂层材料	100

5.2.5 尖晶石连接体涂层材料	103
5.3 本章小结	108
参考文献	109
第6章 封接材料及封接技术	113
6.1 封接技术要求	113
6.2 封接材料分类	114
6.2.1 压缩型封接	114
6.2.2 粘接型封接	117
6.2.3 复合封接	121
6.3 封接界面	123
6.3.1 封接材料与电池	123
6.3.2 封接材料与连接体	123
6.4 封接性能评价方法	125
6.4.1 热膨胀性能	125
6.4.2 特殊温度点	125
6.4.3 相结构演变	126
6.4.4 界面相容性	126
6.4.5 力学性能	126
6.4.6 气密性	127
6.5 封接技术失效分析及提升策略	128
6.5.1 密封失效分析	128
6.5.2 封接性能提升策略	129
6.6 封接材料及封接技术展望	130
6.7 本章小结	130
参考文献	131
第7章 质子陶瓷燃料电池	136
7.1 质子陶瓷燃料电池工作原理	136
7.2 质子陶瓷燃料电池关键材料	137
7.2.1 阳极	137
7.2.2 电解质	138
7.2.3 阴极	146
7.3 电极的特性	147
7.3.1 电子电导率	148
7.3.2 氧离子电导率	148
7.3.3 质子传导	150

7.4 质子陶瓷燃料电池阴极性能提升策略	150
7.4.1 材料优化	151
7.4.2 结构优化	152
7.5 质子陶瓷电池的其他应用	154
7.5.1 电解水制氢	154
7.5.2 电化学合成氨	154
7.5.3 CO ₂ 转化	156
7.5.4 燃料升级	157
7.6 本章小结	157
参考文献	158
第8章 金属支撑固体氧化物燃料电池	163
8.1 基本概念与技术现状	163
8.1.1 MS-SOFC 的定义与结构特征	163
8.1.2 SOFC 支撑结构类型对比	164
8.1.3 MS-SOFC 技术发展历程	165
8.1.4 技术驱动因素	166
8.1.5 MS-SOFC 的应用前景	167
8.2 结构与电池构建	170
8.2.1 MS-SOFC 整体结构设计原理	170
8.2.2 金属支撑体设计	171
8.2.3 过渡层/粘接层设计	172
8.2.4 阳极功能层设计	173
8.2.5 电解质层设计	174
8.2.6 阴极层设计	175
8.2.7 MS-SOFC 整体结构优化	176
8.3 材料体系与制造工艺	176
8.3.1 材料选择总体原则	176
8.3.2 金属支撑体制备技术	177
8.3.3 电解质薄膜制备技术	178
8.3.4 共烧结技术与工艺控制	179
8.3.5 界面工程与扩散控制	180
8.3.6 先进制备技术与产业化前景	183
8.4 本章小结	183
参考文献	184

第 9 章 可逆陶瓷燃料电池	188
9.1 可逆陶瓷燃料电池简介.....	188
9.1.1 可逆陶瓷燃料电池背景.....	188
9.1.2 可逆陶瓷燃料电池工作机理.....	189
9.1.3 可逆陶瓷燃料电池热力学基础.....	191
9.2 可逆陶瓷燃料电池材料.....	197
9.2.1 电解质材料.....	197
9.2.2 空气电极材料.....	199
9.2.3 氢电极材料.....	200
9.3 可逆陶瓷燃料电池性能及应用.....	202
9.3.1 可逆固体氧化物电池性能.....	202
9.3.2 电解质支撑型电堆耐久性测试及应用.....	204
9.3.3 氢电极支撑型电堆耐久性测试及应用.....	205
9.4 本章小结.....	208
参考文献.....	209
第 10 章 陶瓷燃料电池产业	213
10.1 陶瓷燃料电池应用领域.....	213
10.2 陶瓷燃料电池产业发展现状.....	214
10.2.1 美国.....	214
10.2.2 日本.....	215
10.2.3 欧洲.....	216
10.2.4 韩国.....	217
10.2.5 中国.....	219
10.3 我国陶瓷燃料电池典型示范工程.....	221
10.3.1 “氢进万家”科技示范工程.....	221
10.3.2 整体煤气化燃料电池发电技术研究及应用示范.....	223
10.3.3 船用燃料电池示范工程.....	226
10.3.4 风光储电示范工程.....	228
10.4 陶瓷燃料电池产业发展挑战及展望.....	230
10.5 本章小结.....	231
参考文献.....	232

第1章 绪 论

1.1 氢能与燃料电池

能源是人类文明进步的基础和动力^[1]。进入 21 世纪以来，全球能源开发利用方式正经历深刻变革，从依赖矿藏资源的消耗型模式逐步向可再生的天然资源利用模式转变^[2]。与此同时，碳氢燃料的开发利用路径也呈现出从高碳燃料向低碳燃料转变的明显趋势。这一演进过程表明，人类能源利用正朝着低碳化方向持续发展，加快能源绿色低碳转型和实现多能融合，已成为全球共识。

我国拥有全球最大的能源系统，同时也是世界最大的能源生产国和消费国。以煤为主的能源格局在短期内难以根本改变。目前，我国已成为全球二氧化碳(CO₂)排放量最大的国家，年人均排放量超过全球人均水平。面对气候变化挑战和能源转型的迫切需求，我国于 2020 年 9 月，明确提出了“双碳”目标。

在“双碳”目标约束下，我国面临双重挑战：一方面，迫切需要提高以煤为主的传统能源利用效率，有效降低 CO₂ 排放；另一方面，需要大力推动可再生能源的规模化应用。然而，风能、太阳能等可再生能源固有的间歇性特征，以及我国风光资源主要分布在西部和北部地区的不均衡现状，使得大规模可再生能源的储能调峰问题尚未得到有效解决^[3]。在此背景下，煤炭在保障能源安全、维持市场稳定方面的关键作用仍难以完全替代，我国能源转型必然需要一个渐进过程。

2022 年 1 月，习近平总书记在中共中央政治局第三十六次集体学习时明确指出，推动能源革命，要立足我国能源资源禀赋，坚持先立后破、通盘谋划，传统能源逐步退出必须建立在新能源安全可靠的替代基础上^[4,5]。

氢能是一种绿色、低碳、高效、安全的二次能源，具有工业原料和能源产品双重属性。其在交通、工业、建筑、储能等诸多领域展现出广阔的应用前景，已成为全球能源技术革命和产业发展的重要方向^[6,7]。发达国家普遍将氢能规划提升至国家能源战略高度，体现了对这一新兴能源载体的高度重视。截至 2024 年底，全球已有 60 多个国家和地区发布了氢能发展战略。主要国家的氢能战略正从战略规划阶段转向推动实施落地，各国基于自身资源禀赋和发展目标，形成了各具特色的技术路线和发展模式^[8]。美国基于“全方位”能源战略，全链条布局，强化全球技术领导地位，发布《国家清洁氢能战略和路线图》，规定 2030 年清洁氢产

量达 1000 万吨，远期目标电解制氢成本每千克 1 美元^[9]。日本以提升能源安全水平为核心目标，已修订《氢能基本战略》，将发展目标提升至 2040 年氢供应量达到 1200 万吨，并计划未来 15 年投资 15 万亿日元推广氢能应用^[10]。德国将氢能与可再生能源融合发展作为应对气候变化、推动能源转型、实现工业脱碳目标的重要手段，其更新的氢能战略将可再生氢产能目标从 5 吉瓦提升至 10 吉瓦^[11]。全球范围内持续探索氢能应用并开展泛氢能源（绿氨、绿色甲醇等）贸易合作。当前，澳大利亚、沙特阿拉伯等资源丰富的国家正积极争夺全球氢能及泛氢能源的出口市场。

对于我国而言，氢能的战略意义尤为突出。我国能源结构特点为“贫油少气”，发展氢能有助于缓解对外原油依存度，保障国家能源安全，同时提升可再生能源利用水平。氢能作为实现各类能源品种间高效转化的理想媒介，其与电能的耦合将成为解决“双碳”问题的重要选择。

2022 年 3 月，国家发展改革委、国家能源局联合发布《氢能产业发展中长期规划（2021—2035 年）》，明确了氢能发展的基本原则、发展目标和阶段性任务，首次明确了氢的能源属性，提出“氢能是未来国家能源体系的重要组成部分，是用能终端实现绿色低碳转型的重要载体”的重要论断^[12]。2024 年 11 月，氢能被正式写入《中华人民共和国能源法》，标志着氢能正式纳入国家能源体系管理框架^[13]。

氢能产业链涵盖了从上游氢能制取、储运输配，到下游氢能发电、供热、交通等各种应用场景的完整体系。其中，燃料电池高效可靠发电技术和可再生能源规模化电解制氢技术构成了产业发展的核心技术环节^[14]。发展氢能与燃料电池技术是提高我国能源安全，助力能源技术革命，服务能源高质量发展的战略需要^[15]。

1.2 燃料电池类型

1.2.1 燃料电池简介

燃料电池（fuel cell, FC）是一种将燃料（如氢气、碳氢化合物等）的化学能直接转换为电能的发电装置。与传统发电技术相比，燃料电池具有洁净、高效、安全、环保等优点。与内燃机相比，燃料电池能够更高效地将化学能转化为电能，且不受热机的卡诺循环效率的理论限制。与传统电池（battery）相比，蓄电池本质上是能量储存装置，而燃料电池则是能量转换装置，只要能连续供给燃料，燃料电池便能连续发电。因此它被誉为继水力、火力、核电之后的第四代发电技术，美国《时代》周刊将燃料电池列为 21 世纪的高科技之首^[16,17]。

1.2.2 燃料电池分类

如图 1-1 所示, 根据电解质类型的不同, 燃料电池可分为以下几类: 低温/高温质子交换膜燃料电池 (LT/HT-PEMFC)、直接甲醇燃料电池 (DMFC)、碱性燃料电池 (AFC)、磷酸燃料电池 (PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC)、固体氧化物燃料电池 (SOFC) 和质子陶瓷燃料电池 (PCFC) [18,19]。目前, 全球范围燃料电池技术发展主要聚焦于质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池两大技术路线。以高纯氢为燃料、低温运行的质子交换膜燃料电池, 在以氢燃料电池汽车为代表的交通领域展现出广阔的发展空间。高温运行的固体氧化物燃料电池具有燃料适应性强的特点, 不仅可使用粗氢, 还能够直接利用各种含碳燃料 (天然气、生物质气、汽油、柴油、乙醇等), 发电效率高, 在固定式发电和大型长途运输应用领域更为突出。

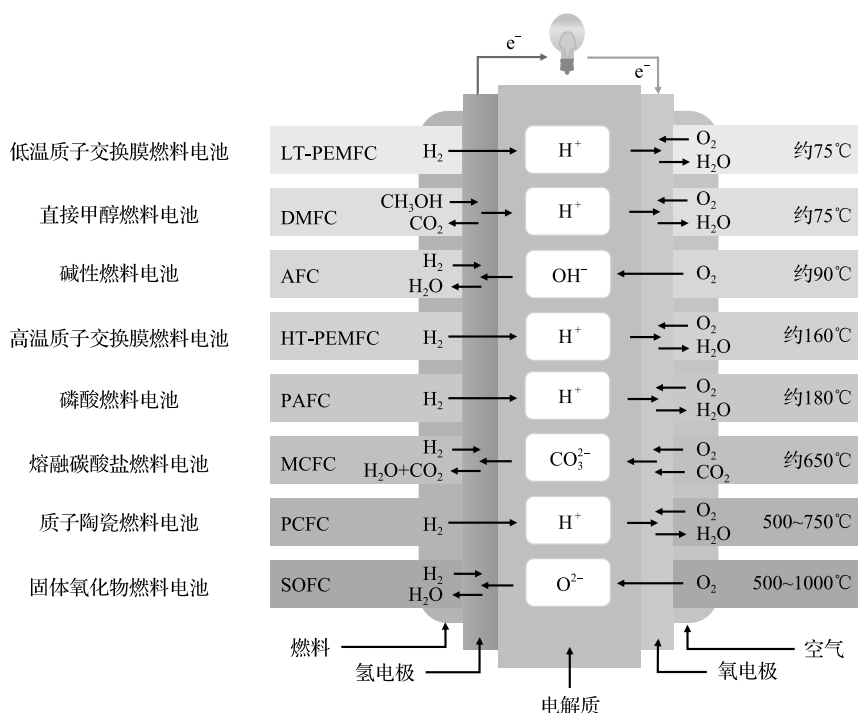


图 1-1 不同类型燃料电池示意图

SOFC 和 PCFC 具有诸多相似特征, 但两者的关键区别在于: PCFC 采用质子导电的陶瓷电解质材料, 而 SOFC 采用氧离子导电的陶瓷电解质材料。这一差异将在第 8 章进行详细介绍。SOFC 和 PCFC 材料以陶瓷为主, 统称陶瓷燃料电池。我国作为陶瓷生产大国, 在陶瓷燃料电池技术发展方面具有良好的产业基础和发

展前景^[20]。

1.3 陶瓷燃料电池原理

从热力学角度分析，燃料电池的本质是将燃料中的化学能转化为电能。反应物转变为生成物的过程中释放的能量为反应的焓变，可用式(1-1)表示：

$$\Delta H = \sum n_j^p H_j^p - \sum n_i^r H_i^r \quad (1-1)$$

式中， n_i 和 n_j 分别为反应物和生成物的物质的量； H_i 和 H_j 分别为反应物和生成物在标准状态下的生成焓； p 和 r 分别为反应物和生成物的系数。根据式(1-1)可知，反应的焓变等于生成物的物质的量乘以生成物的标准生成焓之和，减去反应物的物质的量乘以反应物的标准生成焓之和。

在化学能转化过程中，除了转变为电能的部分外，还有一部分转化为热能。直接转化为电能的能量可以用反应的吉布斯自由能变(ΔG)表示：

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1-2)$$

陶瓷燃料电池通过导电离子做功的方式输出电能，其电荷传输产生的电势差即为开路电压，也称能斯特电势(E_{OCV})，可根据 ΔG 、电池反应中转移的电子数 n 以及法拉第常数 F 表示如下：

$$E_{OCV} = -\frac{\Delta G}{nF} \quad (1-3)$$

从电化学角度出发，图 1-2 展示了氧离子导体陶瓷燃料电池发电的工作原理。

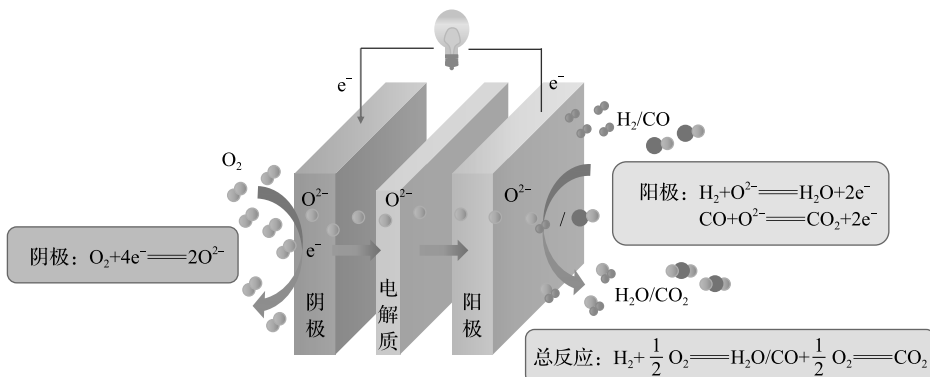


图 1-2 氧离子导体陶瓷燃料电池工作原理示意图

阳极反应：在 SOFC 的阳极，通常使用氢气、甲烷或其他气体作为燃料。当

这些燃料与氧离子接触时,发生氧化反应并释放出电子,电子通过外电路流向阴极。以氢气为燃料时,具体反应如下。

阳极:



阴极反应:在阴极,氧气获得电子后生成氧离子,随后通过电解质材料迁移至阳极反应。具体反应如下。

阴极:



外电路:电子从阳极通过外电路流向阴极,形成电流并提供电能。整个过程完成了从燃料的化学能到电能的转化,而这种转化无需燃烧过程,因此具有高能源效率和低污染物排放的特点。

1.4 陶瓷燃料电池基本概念

1.4.1 理论电动势

理论电动势是指在理想条件下(无内阻、无电阻损耗等),电化学电池在闭合回路中能够产生的电动势。它由电化学反应在电池两极之间转移电子所产生的电势差形成,通常用电压表示,单位为伏特(V)。

对于一个给定的电池系统,其理论电动势可通过标准电极电势差来计算。标准电极电势是指在标准状态下[浓度为 1mol/L , 压力为 1atm ($1\text{atm}=1.01325\times 10^5\text{Pa}$), 温度为 25°C]某个半反应发生时的电极电势。根据能斯特方程可以计算开路电压(OCV), 燃料电池理论电动势的计算公式为

$$E_{\text{OCV}} = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{1/2}} \right) \quad (1-6)$$

式中, R 为摩尔气体常数, $8.3145\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; T 为热力学温度; n 为转移的电子数; F 为法拉第常数, $96485\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$; $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 p_{H_2} 和 p_{O_2} 分别为水蒸气、氢气和氧气的分压。

然而在燃料电池运行过程中,受到极化损失的影响,其实际运行电压 V_{cell} 会低于理论电动势 E_{OCV} 。

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{OCV}} - \eta_a - \eta_o - \eta_c \quad (1-7)$$

式中, η_a 、 η_o 和 η_c 分别为由活化极化、欧姆极化和浓差极化引起的电压降。

1.4.2 活化极化

陶瓷燃料电池中的活化极化是指与电极表面电化学反应速率相关的极化现象, 主要包括阳极活化极化和阴极活化极化两个方面。

在阳极, 燃料(通常是氢气或碳氢化合物)发生氧化反应。该反应速率受到燃料与电极表面之间的化学吸附和电子传递速率的影响。当燃料的浓度较低或反应速率受到限制时, 就会出现阳极活化极化。在阴极, 氧气发生还原反应。这个反应速率取决于氧气与电极表面之间的化学吸附和电子传递速率。若氧气浓度较低或反应速率受到限制, 就会出现阴极活化极化。巴特勒-福尔默(Butler-Volmer, B-V)方程能够很好地描述电流的极化行为, 是目前动力学模拟的基础:

$$j = j_0 \left(\exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha)n F \eta}{RT}\right) \right) \quad (1-8)$$

式中, j 为电流密度; j_0 为交换电流密度; α 为对称因子; n 为相应电极反应转移的电子数; F 为法拉第常数; T 为热力学温度; η 为电极过电位。

基于 B-V 方程, 陶瓷燃料电池阳极和阴极的电流密度分别表示为

$$j_a = j_{0,a} \left(\frac{c_{H_2}^{TPB}}{c_{H_2}^{in}} \exp\left(\frac{\alpha_a n F \eta}{RT}\right) - \frac{c_{H_2O}^{TPB}}{c_{H_2O}^{in}} \exp\left(\frac{-(1-\alpha_a)n F \eta}{RT}\right) \right) \quad (1-9)$$

$$j_c = j_{0,c} \left(\exp\left(\frac{\alpha_c n F \eta}{RT}\right) - \frac{c_{O_2}^{TPB}}{c_{O_2}^{in}} \exp\left(\frac{-(1-\alpha_c)n F \eta}{RT}\right) \right) \quad (1-10)$$

式中, $c_{H_2}^{TPB}$ 、 $c_{H_2O}^{TPB}$ 、 $c_{H_2O}^{in}$ 和 $c_{O_2}^{in}$ 分别为三相界面和入口的氢气和水蒸气浓度。当过电位趋近于零时, 交换电流密度可以表示为与极化电阻(R_p)相关的表达式:

$$j_0 = \frac{RT}{nF} \times \frac{1}{R_p} \quad (1-11)$$

可以看出, 电极极化电阻越小, 交换电流密度越大, 则电池能够获得更大的电流密度, j_0 一般可以通过塔费尔(Tafel)公式拟合得到, 此外为了更详细地描述电极参数与交换电流密度的关系, 阳极和阴极的交换电流密度还可以表示为

$$j_{0,a} = \gamma_a \left(\frac{p_{H_2}}{p_{H_2,ref}} \right)^A \left(\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O,ref}} \right)^B \exp\left(\frac{-E_{act,a}}{RT}\right) \quad (1-12)$$

$$j_{0,c} = \gamma_c \left(\frac{p_{O_2}}{p_{O_2,ref}} \right) \exp \left(\frac{-E_{act,c}}{RT} \right) \quad (1-13)$$

式中, γ_a 和 γ_c 为阳极和阴极的指前因子; p_{O_2} 和 $p_{O_2,ref}$ 为氧气分压和氧气参考压力; p_{H_2} 和 $p_{H_2,ref}$ 为氢气分压和氢气参考压力; p_{H_2O} 和 $p_{H_2O,ref}$ 为水蒸气分压和对应的参考压力; A 、 B 为对应项的反应级数; $E_{act,a}$ 和 $E_{act,c}$ 为阳极和阴极的活化能。

降低活化极化的方法包括提高电极催化活性、增加气体扩散速率等。陶瓷燃料电池通常在高温下运行, 有助于提高电化学反应速率, 但同时也需要考虑材料的稳定性和耐高温性能。

1.4.3 欧姆极化

欧姆极化主要是由体系内材料的电阻和接触电阻构成, 符合欧姆定律。材料电阻包括阳极、阴极、电解质及导线电阻等。由欧姆极化引起的电压降 η_0 如下所示:

$$\eta_0 = iR \quad (1-14)$$

式中, i 为电流; R 为电阻。电解质中的离子电导率远远低于电极中的电子电导率, 因此, 电解质部分贡献的欧姆极化占主要部分, 为了降低这部分极化损失, 一般可以对电解质进行以下优化: 改进制备工艺, 在保证机械强度的前提下减少电解质厚度; 开发新材料, 在保证稳定性的前提下开发更高离子电导率的电解质材料。

1.4.4 浓差极化

浓差极化是指气体在电极附近的浓度梯度引起的电压损失, 可表示为根据入口气体初始浓度计算的能斯特电势与反应位点气体浓度对应的能斯特电势之差:

$$V_{conc} = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \Bigg|_{\text{入口}} - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \Bigg|_{\text{反应区}} \quad (1-15)$$

浓差极化主要涉及气体在电极表面的传递和反应过程, 具体原因包括气体的扩散速度有限和反应物在活性位点的吸附解离速度有限等, 这些限速步骤属于物理过程, 而不是化学过程。当把浓差极化电压降和电流密度联系起来时, 可表示为

$$V_{conc} = -\frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{j}{j_L} \right) \quad (1-16)$$

式中, j_L 为极限电流密度。由于浓差极化的存在, 电子和离子的传输会受到限制, 导致局部反应速率减缓。减轻浓差极化有助于提高电池的性能和效率, 一般可以通过以下方法来减缓浓差极化:

(1) 提高工作温度: 在较高的温度下, 气体分子具有较大的动能, 可减小浓差极化;

(2) 优化电极催化剂: 使用高效的电极催化剂, 提高反应速率, 减小浓差层对电极反应的限制;

(3) 优化电极结构和流道: 通过优化电极结构和流道, 加快气体扩散过程, 可以降低浓差极化的影响。

1.5 陶瓷燃料电池结构类型

根据支撑结构的不同, 陶瓷燃料电池可分为电解质支撑型、阳极支撑型、阴极支撑型和金属支撑型等类型。电解质支撑型电池的电解质厚度一般为 $150 \sim 300 \mu\text{m}$, 相对其他类型电池, 该类型电池的欧姆损失较大, 需要在较高温度下运行^[21]。目前阳极支撑型电池应用最广泛, 阳极支撑体厚度一般为数百微米, 提供了更多的阳极三相界面。该类型电池的电解质厚度一般为几十微米甚至数微米, 中低温性能较好, 目前商业化电池多为阳极支撑型。与电解质支撑型和阳极支撑型对比, 阴极支撑型电池性能较差, 研究较少。金属支撑型电池具有高机械强度、优异的抗热震性能、低成本和易于封接等优点, 尤其是金属支撑型电池为阳极侧高压运行提供了可能, 但其电解质低温致密化工艺等问题仍然有待进一步研究。

基于电池的几何形状, 陶瓷燃料电池可以分为平板状和管状两种。平板状陶瓷燃料电池几何形状比较简单, 制造成本较低; 电流路径较短, 具有更高的功率密度。但在实际应用中, 平板状陶瓷燃料电池的密封较为困难, 性能易衰减且抗热循环性能较差。管状陶瓷燃料电池的优点在于电池容易组装和密封, 机械强度高, 具有优异的长期运行稳定性和抗热震稳定性; 但其制备工艺复杂, 电流路径较长且不易集流, 功率密度相对较低。

1.6 陶瓷燃料电池特点及应用

燃料电池具有模块化运行的特点, 具有效率高、排放低、噪声小、环境友好、占地面积小等优势, 在大型电站、分布式发电、小型家用热电联产和备用电源等方面有很好的应用前景。陶瓷燃料电池燃料来源广泛, 燃料预处理需求较少, 内部重整和内部热集成使系统设计更为简化。分布式发电是当前重要场景之一, 广

泛应用于商业楼宇、社区、学校、医院、数据中心、特殊事业部门及军用领域等场景，作为供电电源可以提高电力供给的稳定性，同时在一定场景下还可以实现热电联产以提高综合能效^[6]。此外，将陶瓷燃料电池与煤制合成气相结合的整体煤气化燃料电池(integrated gasification fuel cell, IGFC)发电系统，可以实现燃煤发电的 CO₂ 近零排放，彻底解决煤电的排放问题，非常适合我国以煤炭为主的资源禀赋，在提高煤电效率的同时可为新型电力系统提供灵活调节手段。发展 CO₂ 近零排放的 IGFC 技术助力我国煤电技术转型，具有重要的战略意义^[22-24]。

美国、欧洲、日本等发达国家和地区在陶瓷燃料电池技术方面，一直处于世界领先地位，经过几十年的技术研发和攻关，已经基本实现了陶瓷燃料电池技术的商业化运行。其中由风险资金成立的 Bloom Energy 公司，是目前商业化最成功的燃料电池公司，主要采用天然气为燃料，实现了数百千瓦到兆瓦级分布式发电系统的商业化应用，主要客户包括苹果、沃尔玛、美国银行、谷歌等公司^[25]。

国外陶瓷燃料电池的研发方向主要聚焦于降低成本和提高稳定性方面，目前已进入市场导入阶段。而国内陶瓷燃料电池产业起步较晚，尚处于技术验证阶段。

“十二五”期间，中国矿业大学(北京)作为依托单位承担了国家“973 计划”项目“碳基燃料固体氧化物燃料电池体系基础研究”，开展固体氧化物燃料电池相关基础理论和关键技术研究^[26]；同期，中国科学院大连化学物理研究所、中国科学院宁波材料技术与工程研究所、华中科技大学和中国科学院上海硅酸盐研究所分别承担了“863 计划”项目“5kW 级 SOFC 电堆关键技术”和“25kW 级固体氧化物燃料电池系统集成技术”，在陶瓷燃料电池关键材料及单电池开发方面取得很大进步。

“十三五”期间，大型能源集团如国家能源集团、国家电网、华能集团、潍柴动力等开始深度介入陶瓷燃料电池技术研发，为该技术的产业化发展提供了良好契机^[27]。

2017 年，国家能源集团牵头，联合中国矿业大学(北京)、北京低碳清洁能源研究院等单位承担了国家重点研发计划。2022 年，项目团队在宁夏煤业煤制油分公司厂区建成国内首个兆瓦级 IGFC 试验基地，自主设计和建成了国内首套百千瓦级 CO₂ 近零排放的 IGFC 试验示范系统，由煤气化净化工业装置供气，包括 5 套 20kW 级陶瓷燃料电池发电模块，实现了连续稳定运转，燃料电池系统最大发电功率 101.7kW，CO₂ 捕集率 98.6%，成功验证了 IGFC 模块化发电技术路线^[3]。

1.7 本章小结

氢能是构建以清洁能源为主的多元化能源供给体系的重要组成部分，燃料电池技术代表了 21 世纪能源领域的革命性技术。未来 10~20 年将是中国氢能与燃

料电池产业发展的重要机遇期。

陶瓷燃料电池具有燃料适应性强的显著特点,不仅可使用氢气且对纯度要求不高,更重要的是能够直接利用各种“泛氢”及含碳类燃料,与现有能源供应系统具有良好的兼容性,在固定式电力领域应用前景广阔。

我国需要因地制宜地开展陶瓷燃料电池技术的商业应用示范,加快推动陶瓷燃料电池技术研究和自主研发进程,探索形成适合我国国情的商业化发展路径。基于陶瓷燃料电池的氢能利用技术不仅可以保障我国能源安全,还能够带动相关产业转型升级,推动能源领域的绿色低碳革命,为实现“双碳”目标提供重要的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 国家能源局. 第二届“一带一路”能源部长会议在山东青岛成功举办[EB/OL]. 国家能源局官网, (2021-10-19)[2025-06-30]. https://www.nea.gov.cn/2021-10/19/c_1310255314.htm.
- [2] 彭苏萍. 氢电耦合是解决“双碳”问题的重要选择! [EB/OL]. 国际能源网, (2023-05-02)[2025-06-30]. <https://www.in-en.com/article/html/energy-2323690.shtml>.
- [3] 胡亮, 杨志宾, 熊星宇, 等. 我国固体氧化物燃料电池产业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 118-126.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 新一代煤电升级专项行动实施方案(2025—2027 年)[EB/OL]. 国家发展改革委, (2025-03-26)[2025-06-30]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=20497>.
- [5] 中国发展网. 实现碳中和要紧扣效率优先实现“换道超车”[EB/OL]. 中国发展网, (2022-01-17)[2025-06-30]. <http://www.chinadevelopment.com.cn/news/ny/2022/01/1763840.shtml>.
- [6] 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.
- [7] 韩红梅, 杨铮, 王敏, 等. 我国氢气生产和利用现状及展望[J]. 中国煤炭, 2021, 47(5): 59-63.
- [8] 新华网. 2022 金融街论坛年会“数字经济与金融科技平行论坛: 金融科技践行 ESG 理念, 推动实体经济可持续发展”在京举行[EB/OL]. 新华网, (2022-11-23)[2025-06-30]. https://www.news.cn/fortune/2022-11/23/c_1211703769.htm.
- [9] U.S. Department of Energy. U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap[EB/OL]. U.S. Department of Energy, (2023-06-05)[2025-06-30]. <https://www.hydrogen.energy.gov/library/roadmaps-vision/clean-hydrogen-strategy-roadmap>.
- [10] Ministry of Economy, Trade and Industry(METI). Basic Hydrogen Strategy[EB/OL]. METI, (2017-12-26)[2025-06-30]. https://climate-laws.org/document/2017-basic-hydrogen-strategy_68dc.
- [11] Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. National Hydrogen Strategy[EB/OL]. Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, (2020-06-10)[2025-06-30]. <https://www.giz.de/en/downloads/giz2020-en-national-hydrogen-strategy.pdf>.
- [12] 国家发展改革委, 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021-2035 年)[EB/OL]. 国家发展改革委, (2022-03-23)[2025-06-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202203/t20220323_1320045.html?state=12.
- [13] 张胜杰. 能源法为氢能产业注入更大信心[N/OL]. 中国能源报, 2024-11-18(3). https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202411/18/content_30031055.html.