

—《能源工程技术丛书》—

固体氧化物 燃料电池技术

王绍荣 叶晓峰 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

能源工程技术丛书

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

固体氧化物燃料电池技术

王绍荣 叶晓峰 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

固体氧化物燃料电池技术/王绍荣,叶晓峰编著. —武汉:武汉大学出版社,2015.10

能源工程技术丛书

ISBN 978-7-307-16223-5

I. 固… II. ①王… ②叶… III. 固体—氧化物—燃料电池
IV. TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 140289 号

责任编辑:邓 瑶

责任校对:郭 芳

装帧设计:张希玉

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:武汉市金港彩印有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:8 字数:152千字

版次:2015年10月第1版 2015年10月第1次印刷

ISBN 978-7-307-16223-5 定价:56.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)是目前正在普遍研究的燃料电池之一。它采用固体氧化物(陶瓷)电解质,在中高温(600~900℃)下运行,其废热可以用来推动燃气轮机或蒸汽轮机进一步发电,因此 SOFC 发电效率可超过 60%,是发电效率最高的燃料电池。若再实现热电联产,其能量利用效率可达到 80%。在能源和环境矛盾日益尖锐的当今社会,SOFC 成为各国争相开发的新一代能量转换技术。

SOFC 的运行温度使得燃料的内部重整成为可能,从而可以直接使用各种各样的燃料(如甲烷、煤气、甲醇、酒精、石油液化气以及各种油料)。考虑到未来石油资源的日趋枯竭,天然气、生物质气的大量运用,并结合我国能源储量中煤炭占较大比例的特点,我们有理由认为 SOFC 的开发利用是解决我国能源需求和环境保护之间矛盾的最有效途径之一。

SOFC 经过适当的技术改造后,可以反向运行,利用夜间剩余电力或者小水电、风电等电解高温水蒸气制氢,我们称之为高温固体氧化物电解池(Solid Oxide Electrolyzing Cell, SOEC)。从原理上讲,SOEC 可以看作 SOFC 的逆运行。相对于常温电解水而言,SOEC 因工作温度高,过电位小,在能量利用效率上具有很大优势。因此,SOEC 是未来高效制氢的候选技术之一。而氢能燃料电池汽车未来有可能替代内燃机汽车成为新一代的交通工具,其开发利用后可用氢能替代汽油,降低我国对进口石油的依赖,同时净化城市空气。

上述 SOFC、SOEC 技术所需要的原材料主要为稀土氧化物,不需要贵金属。众所周知,我国是稀土大国,曾经大量廉价出口稀土矿藏。如果将其转化为 SOFC、SOEC 等高技术产品,则会产生显著的经济效益,同时推动稀土加工业的发展,提供就业机会。最重要的是,SOFC、SOEC 加上我国的煤炭资源优势,如果能够解决我国部分能源环境问题,则必将缓解我国对进口石油、进口铀资源等的依赖,为经济、社会的可持续发展提供动力。

目前,SOFC 在发达国家已经取得了举世瞩目的成就。在 SOFC 技术的发展史上,西门子西屋公司无论在系统发电规模(最大 250kW)还是在衰减率(0.1%/1 000h),抑或是实际运行的寿命(数万小时)上,都做了里程碑式的工作。尽管由于其采用的技术(EVD、CVD)成本非常高,导致在产业化时遇到难以克服的困难,减缓了其实用化步伐,但是,其成果以及国外其他公司的相关结

果都证明 SOFC 是可以实现长寿命的。

鉴于 SOFC 的重要性,它在我国也得到了极大的重视。自“九五”计划起,国家科技部和中国科学院就进行了部署。从“十五”到“十二五”,科研经费成倍增长。中国科学院上海硅酸盐研究所从“九五”开始就得到了科技部 863 项目的重点支持。其中“九五”计划项目针对 1000 °C 工作的高温电池和错流设计的电堆进行了研究。2001 年 3 月,首次运行了一个含 80 片单电池的電堆,开路电压达到 85.3V,最大功率达到 810W。随着国际 SOFC 发展向中温化的过渡,自“十五”计划开始,研究重点转移到攻克阳极支撑型 SOFC 的技术。上海硅酸盐研究所于 2004 年在国内率先实现了面积大于 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 的阳极支撑型电解质复合膜的小批量制备。之后,经过不断的努力,相继提升了膜片的平整度、功率密度、强度、抗还原变形性,最终获得了该技术的自主知识产权。2007 年 3 月以前,相继运行了 3 个中温(750°C)电池堆。每堆由 60 片电池组成,单片面积 $10 \times 10 \text{cm}^2$,开路电压达到 60V,单堆最大功率达到 700W。

“十一五”期间国家投入力度明显加大,设置的项目数也显著增加,中国科学院宁波材料所、大连化学物理所、中国科技大学、哈尔滨工业大学、华南理工大学、西安交通大学等机构也大力开展 SOFC 研究。各单位都相继取得了显著的进展,极大地丰富了我国 SOFC 技术研发的内容。以上海硅酸盐研究所为例,“十一五”期间重点对电堆寿命、热循环次数和含碳燃料的实际应用展开了攻关,标志性成果是成功地组装并运行了 1.5kW 的中温平板型固体氧化物燃料电池堆;同时,对短堆进行了长期寿命考察。电堆最长运行时间超过 3300h,衰减率小于 3%/1000h。

“十二五”期间,科技部 863 计划对 SOFC 技术的投入明显增长,主要集中在攻克 25kW 级平板型电堆技术和管型电堆技术,以及面向实际应用的系统集成技术,努力实现 5kW 级的 SOFC 独立发电系统的集成和调试,2014 年底已经实现了 5kW 级独立发电系统的发电和示范运行。

总的来说,我国对 SOFC 技术的相关研究虽然起步较晚,但在国家高度重视和研究人员的努力下,已经取得了可喜的成绩。例如,中国科学院宁波材料所已经建成 SOFC 单电池生产线,对外公开销售从粉体到单电池和短堆的一系列产品。其他兄弟单位,如中国科学院过程工程研究所、大连化学物理研究所、中国科技大学、哈尔滨工业大学、吉林大学、中国矿业大学、北京科技大学、华中科技大学、华南理工大学、厦门大学、南京工业大学、上海交通大学、西安交通大学、清华大学、四川大学等,也都开展了中温 SOFC 的相关工作,取得了很大的成绩。这些研究为我国 SOFC 的产业化发展提供了坚实的基础,SOFC 技术研发的春天即将到来。

在这样的背景下,我们认为有必要大力宣传和普及 SOFC 的基础知识,使之得到社会的了解;同时,青年人才的培养也是推动 SOFC 发展最迫切的任务。本书的目的在于与读者分享多年 SOFC 科研工作中的体会,针对一些重要的内容,从作者的理解出发加以归纳和总结,帮助读者理解 SOFC 的一些重要内容。本书无意于全面总结已有的文献和知识,也不打算写成本面面俱到的教科书。因为到目前为止,已经有一些这种类型的优秀作品出版。

作者拟以自身的视角来观察和体会 SOFC 材料、单电池、电堆结构和测试方法,总结其中一些有趣的现象和规律,并对必要的理论基础加以简要的说明,以便帮助读者以不太枯燥的方式尽快地掌握 SOFC 技术的相关要点,并领略其魅力。正如前人所说,写书如造园。本书大量的素材其实并非原创,在此事先申明。在本书中,读者会发现相当多的科学内容其实都可以在其他教科书或文献中找到,作者只能保证是在认真学习并有独立思考的前提下进行了归纳和总结,并无照抄的本意。作者只是站在前人的肩膀上对有关知识进行了归纳与总结,在此首先对前人致以崇高的敬意。如果无意之中本书某段内容与前人的作品雷同,在此也先表示感谢。作者唯一的希望是读者能够通过对本书的学习而得到对自己有用的东西,哪怕是一点点也足以让作者欣慰。

编 者

2015 年 2 月

目 录

1 燃料电池	(1)
1.1 燃料电池的基本原理	(1)
1.2 燃料电池的家族成员	(2)
1.3 燃料电池的优势	(5)
1.4 SOFC 的魅力	(6)
2 能量转化的方向性原则	(8)
2.1 热力学第一定律回顾	(8)
2.2 热力学第二定律回顾	(11)
2.3 SOFC 的可逆电动势	(14)
2.4 直接碳 SOFC 的可能性分析	(16)
2.5 热力学计算的更便捷方法	(17)
3 能量转化的速率	(19)
3.1 线性变化与非线性变化	(19)
3.2 能量消耗的本质	(20)
3.3 SOFC 电堆中的能量损耗	(22)
3.4 SOFC 系统中的能量损耗	(24)
3.5 SOFC 系统效率分析案例	(25)
4 电解质与氧空位	(27)
4.1 氧化锆系电解质	(28)
4.2 氧化铈系电解质	(31)
4.3 镓酸镧系电解质	(34)
4.4 高温质子导体电解质	(39)
4.5 基于氧化铈电解质的电池效率分析案例	(41)
5 电解质膜(片)的制备	(46)
5.1 电解质片的干法压制	(46)

2 | 固体氧化物燃料电池技术

5.2	电解质膜的湿法流延	(47)
5.3	电解质膜的其他成型方法	(50)
5.4	烧结的一般规律	(50)
5.5	烧结助剂	(51)
5.6	烧结的温度制度	(53)
5.7	阳极支撑型电解质膜的制备案例	(54)
6	阴极材料体扩散和表面交换	(56)
6.1	LSM	(58)
6.2	钴酸盐	(59)
6.3	其他钙钛矿结构氧化物	(59)
6.4	层状钙钛矿结构氧化物	(60)
6.5	双钙钛矿结构氧化物	(60)
6.6	氧表面交换系数和体扩散系数的测量	(60)
7	阴极活性位的控制技术	(62)
7.1	三相界面控制技巧	(63)
7.2	阴极支撑管式电池制备案例	(67)
8	阳极材料的研究重点	(69)
8.1	活性层阳极	(70)
8.2	支撑层阳极	(71)
8.3	新型阳极材料	(72)
8.4	应用于 SOFC 的燃料	(74)
9	测试技术	(76)
9.1	原材料的分析测试	(76)
9.2	电极极化测试	(81)
9.3	单电池的测试	(83)
9.4	电堆的测试	(86)
10	电堆技术	(90)
10.1	平板型 SOFC, 不平凡的平面	(90)
10.2	密封, 千里之堤溃于蚁穴	(99)

10.3 电堆的寿命,界面的化学问题	(102)
11 SOFC 发电系统技术	(103)
11.1 SOFC 发电系统类型简介	(104)
11.2 SOFC 发电系统原理与技术指标简介	(107)
11.3 SOFC 发电系统组成与部件	(109)
11.4 SOFC 发电系统研发与产业化发展	(113)
11.5 SOFC 发电系统成本分析与未来展望	(114)
参考文献	(116)
后记	(117)

1 燃料电池

燃料电池是一种将存在于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置。与常规电池的不同之处在于燃料和氧化剂不是储存在电池内部,而是来自外部供给,即只要不断向其提供燃料和氧化剂,就可以连续不断地发电。

能源是人类社会发展的基础。高度发展的能源工业奠定了现代文明的基石。随着经济和社会的发展,能源需求和供应之间的鸿沟日益明显,同时,化石能源造成的生态环境恶化也对人类社会的可持续发展具有极大的挑战。目前,能源工业存在明显的弊端,化石能源的化学能必须转变为热能后才能转变为机械能或电能,转化效率受卡诺循环限制,仅为 33%~55%。在这个过程中,同时还会产生大量的废水、废气、废渣以及噪声,大规模的污染仍然没有得到根本解决。对于发电行业来说,虽然采用的技术正在不断升级,如开发出了超高压、超临界、超超临界机组,开发出了流化床燃烧和整体气化联合循环发电技术,但是发出的电仍需远距离输送,成本高。目前,电网采用的超高压输电技术,在一定程度上降低了输电损失,但是到达用户端的综合能源效率仍然只有 35%左右。

燃料电池(Fuel Cell)技术的出现为人类的能源利用方式改革带来了新的契机,它可以高效地将燃料中的化学能转变为电能,同时大大降低污染物的排放。燃料电池所独具的分布式供能方式具有灵活多变的特点,能在保证高效率的前提下适合于多种用途。

1.1 燃料电池的基本原理

最早的燃料电池可以追溯到 1839 年。英国人 Grove 以铂黑为电催化剂的氢氧燃料电池点亮了伦敦演讲厅的照明灯。燃料电池的研究在 20 世纪 50 年代取得了实质性的进展,英国剑桥大学的 Bacon 利用高压氢氧制成了具有实用功率水平的燃料电池。20 世纪 60 年代,这种电池成功应用于 Apollo 登月飞

船。20世纪80年代开始,各种小功率电池在宇航、军事、交通等各个领域中得到应用。

燃料电池是一种将存在于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置。与常规电池的不同之处在于燃料和氧化剂不是储存在电池内部,而是来自外部供给,即只要不断向其提供燃料和氧化剂,就可以连续不断地发电。因此,它是一种能量转换装置,而常规电池本质上是能量储存装置。

燃料电池单电池的基本结构为电解质、阳极和阴极。阳极为电池的负极,在燃料电池工作时,阳极发生氧化反应,失去的电子由外电路传输到阴极;阴极为电池的正极,发生还原反应,得到电子而产生可供传导的离子;电解质起隔离燃料和氧化剂,以及传导离子的作用。以氢氧燃料电池为例,其原理如图1-1所示。

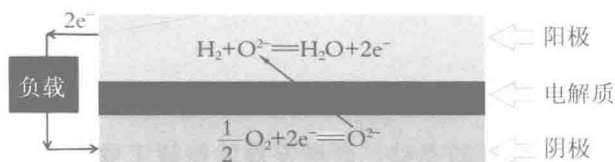


图 1-1 氢氧燃料电池原理示意图

阳极上 H_2 发生氧化反应失去电子,变成 H^+ ,后者与 O^{2-} 反应生成 H_2O ;电子由阳极经外电路传导至阴极,形成电流。 O^{2-} 则由阴极 O_2 生成,经电解质传导至阳极发生反应。由于单个燃料电池的电压只有 1V 左右,实际应用时需要将多个单电池串联,组成电池堆来获得高的电压以及功率。电池堆中除了单电池外,最重要的是串联电池所需的连接板,以及能将它们密封在一起的密封材料。

1.2 燃料电池的家族成员

燃料电池有多种类型,按使用的电解质不同主要分为以下 5 类:

(1) 碱性氢氧燃料电池。

碱性氢氧燃料电池(AFC)是燃料电池领域最早发展起来的技术,并且技术高度成熟。AFC 最重要的应用是作为载人航天飞行器中的电源,电池反应生成的水经过净化还可供宇航员饮用,同时供氧系统也可以与生命保障系统互为备份。美国成功地将 Bacon 型 AFC 用于 Apollo 登月飞行,石棉型 AFC 用于航天飞机。

发展碱性燃料电池的核心技术是要避免二氧化碳对碱性电解液成分的破坏。不论是空气中百万分之几的二氧化碳成分,还是烃类燃料的重整气所含有的二氧化碳,使用时都要进行去除处理,这无疑增加了系统的总体造价。此外,

电池进行电化学反应生成的水需及时排出,以维持水平衡。因此,简化排水系统和控制系统也是碱性燃料电池发展中需要解决的核心技术问题。

(2)磷酸型燃料电池。

磷酸型燃料电池(PAFC)是以天然气重整气作为燃料,以空气作为氧化剂,以 Pt/C 为电催化剂,以浸有浓磷酸的 SiO_2 微孔膜作为电解质的燃料电池。与 AFC 相比,其突出优点是贵金属催化剂用量大大减少,对还原剂的纯度要求有较大降低,一氧化碳含量可达 5%。目前,国际上功率较大的实用燃料电池电站均用这种燃料电池。到 2002 年初,美国已在全世界安装测试了 200kW PAFC 发电装置 235 套,累计发电 470 万小时。在美国和日本,有几套装置已达到连续发电 1 万小时的设计目标。但是 PAFC 工作温度在 200℃ 左右,余热利用价值低,热电转化效率仅有 40% 左右;同时启动时间长,不适合用作移动电源。

(3)熔融碳酸盐燃料电池。

熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)的工作温度为 650~700℃,以浸有 K_2CO_3 和 Li_2CO_3 的 LiAlO_2 隔膜为电解质,电极催化剂采用氧化镍,以煤气或天然气为燃料。美国能量研究公司(ERC)已经具备年产 2~5MW 外公用管道型 MCFC 的能力。1995 年,ERC 在加州 Santa Clara 建立了 2MW 试验电厂。2000 年,日本日立公司开发出 1MW 的 MCFC 发电装置。东芝也已开发出低成本的 10kW MCFC 发电装置。MCFC 中阴极、阳极、电解质隔膜和双极板是基础研究的四大难点。这四大部件的集成和电解质管理是 MCFC 电池组及电站模块安装和运转的核心技术。

(4)质子交换膜燃料电池。

质子交换膜燃料电池(PEMFC)的特点是工作温度低,启动速度快。它的核心是电极-膜-电极三合一组件的制备技术。通常采用热压的方法将电极、膜、电极压合在一起,形成膜电组件,并在电极内加入质子导体,以改善电极与膜的接触。质子交换膜的技术参数直接影响着三合一组件的性能,因而关系到整个电池及电池组的运行效率。20 世纪 90 年代,加拿大 Ballard 公司在该领域取得突破性进展,生产的电池组体积比功率已超过 1300W/L,超过了 DOE 制定的电动车标准。随着 PEMFC 技术的飞速发展,实用型的 PEMFC 已经开始应用于各个领域。德国海军已经配备了 4 艘用 Siemens 公司制造的 300kW PEMFC 作为动力源的潜艇, Ballard 公司已经开始出售商业化的 250kW PEMFC 发电装置、电动车用 PEMFC 和各种便携式电源,日本丰田等汽车公司则已经推出商业化的燃料电池电动车。目前,PEMFC 的成本以及加氢站的建设制约着其商业化进程。因此,改进其必要的组件性能、降低运行成本、建设加氢站等是发展 PEMFC 的重要方向。

(5) 固体氧化物燃料电池。

固体氧化物燃料电池(SOFC)的电解质、阳极和阴极均为陶瓷材料,是一种全固态结构燃料电池。SOFC不使用贵金属催化剂,运行温度高(600~1000℃),而且燃料适用范围广,余热温度高,适合热电联产,是一种高效的清洁能源系统。陶瓷电解质是SOFC的核心材料,决定了电池的运行温度。目前,常用的SOFC电解质材料为YSZ(Y_2O_3 稳定的 ZrO_2),阳极材料一般为Ni-YSZ金属陶瓷,阴极材料为LSM($La_xSr_{1-x}MnO_3$)等钙钛矿结构复合氧化物材料。

SOFC的结构类型主要有管式、平板式两类。管式SOFC以西门子西屋公司的阴极支撑管式电池为代表,如图1-2所示。单电池为一端封闭的管子,电池由内向外依次为多孔支撑管、阴极、电解质及阳极。同时,电池侧壁上具有陶瓷连接体,通过连接体与其他电池阳极串联。6个单电池串联为一组,3组并联在一起组成一个基本单元。管式SOFC的优点是抗热震性强,不需要密封,组堆相对简单;缺点是电流收集困难,制造成本高。

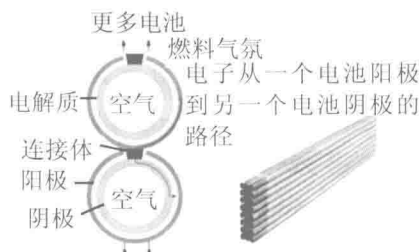


图 1-2 管式 SOFC 结构示意图

平板式SOFC的电池组件均为薄的平板结构,这种简单设计的几何形状使其制作工艺大为简化,如图1-3所示。阳极、电解质、阴极薄膜组成单体电池,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。平板式SOFC的优点是制备工艺简单、成本低,电流收集路径短,功率密度高;缺点是密封困难,对金属连接板性能的要求高。

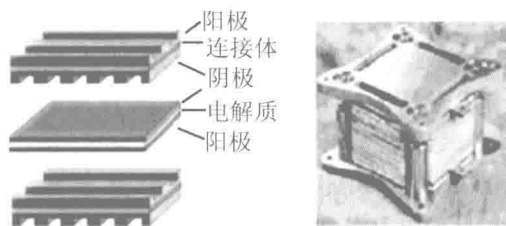


图 1-3 平板式 SOFC 结构示意图

不同类型的燃料电池所采用的材料各不相同,工作温度也不相同,表1-1是不同类型燃料电池的主要特性。

表 1-1 不同种类燃料电池的比较

类型		碱性 燃料电池 (AFC)	磷酸型 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)	固体氧化物 燃料电池 (SOFC)
燃料		纯氢	氢气	煤气、天然气、甲醇等	纯氢	煤气、天然气、甲醇、碳氢化合物等
电解质		KOH	磷酸	熔融碳酸盐	聚合物膜	YSZ、SSZ 等
电解质状态		液态	液态	液态	固态	固态
电极	阳极	Pt/Ni	多孔石墨 (Pt 催化剂)	镍	Pt/C	Ni-YSZ 金属陶瓷
	阴极	Pt/Ag	含 Pt 催化剂+ 多孔介质石墨	镍	Pt/C	LSM、LSCF 等
工作温度/°C		50~100	约 200	约 650	约 80	600~1 000
系统工作效率/%		35~40	40~45	50~65	30~40	60~80

1.3 燃料电池的优势

(1) 燃料电池具有高的能量转化效率。

传统的火力发电技术是将燃料中的化学能转化为热能,热能再通过汽轮机转化为机械能进行发电;燃料电池技术则是将燃料中的化学能通过电化学反应直接转化为电能,不受卡诺循环效率的限制,能量转化效率高。例如,SOFC 的发电效率可以达到 65%,与汽轮机进行联合发电则可达 75%以上。

(2) 燃料电池对环境友好。

传统火力发电过程中会排放大量的二氧化碳、氮氧化物及硫化物等污染物,对环境影响极大;而燃料电池的主要污染物排放量远低于火力发电,尤其是氢氧燃料电池,可以实现发电过程零污染。此外,燃料电池发电系统中机械部件少,产生的噪声相对较低。

(3) 可靠性高。

与燃气涡轮机或内燃机相比,燃料电池没有机械传动部件,因而系统更加安全可靠,不会因传动部件失灵而引发恶性事故。

1.4 SOFC 的魅力

与其他类型燃料电池相比,SOFC 具有许多独特的优点:

(1)SOFC 为全固态结构,避免了液态电解质所带来的腐蚀和电解液流失等问题;

(2)电池工作温度高,电极反应过程相当迅速,无须采用贵金属电极,电池成本低;

(3)电池排出的高温余热可充分利用,既可用于取暖,又可与蒸汽轮机联用循环发电,能量综合利用效率可达 80%以上;

(4)燃料适用范围广,可直接用天然气、煤气化气和其他含碳燃料。

SOFC 可作为大型发电设备,与蒸汽轮机连用,能量利用率可达 80%以上。在这一应用领域,西门子西屋公司是当之无愧的先行者。该公司在荷兰安装的 100kW 管状 SOFC 系统,截至 2000 年底关闭,累计工作了 16612h,能量效率为 46%。2002 年 5 月,该公司又与加州大学合作,在加州安装了一套 220kW SOFC 与气体涡轮机联动发电系统,能量转化效率达到 70%。

SOFC 适合作为分散式电源供电,并实现热电联供,简易、安全、方便。在电网不能覆盖的地区,如分散的居民小区、偏远的海岛、哨所、山区等建立小型电站。

SOFC 还可以作为备用电源,以应对突然停电等突发事件。在 2003 年 8 月 14 日的突然停电中,纽约海军 Saratoga Springs 的燃料电池电站就为 Naval Support Unit 的居民提供了电力。

SOFC 作为移动式电源,可以为大型车辆提供辅助动力。美国汽车系统及零部件供应商 Delphi 研发的 SOFC 辅助电源在 Peterbilt Motor 的 386 重型卡车上装机并试运行,测试结果表明该辅助电源能够提供维持卡车正常行驶所需要的全部电力(包括空调以及电池的电力等),总计能提供约 800W 电力。

SOFC 还以其低燃料消耗和低噪声等优异性能引起了军方的关注,将 1kW 之内的小型固体氧化物燃料电池系统用于野战部队士兵的供电电源,也是目前的研究方向。

中国稀土资源丰富,发展 SOFC 技术具有十分有利的条件。以天然气和净化煤气为燃料的 SOFC 发电效率高达 55%~65%,还可提供优质余热用于联合循环发电,是一种优良的区域性供电电站。21 世纪,这种区域性的、环境友好的、高效的发电技术有可能发展成为一种主要的供电方式。目前的电网均采用高压长距离输电的方式,将偏僻山区的水电和坑口、路口,及海口处的火电输送

到负荷中心地带。中外近年来多次电网事故证明,在地震、水灾、暴风、冰雪、雷电等自然灾害面前,这种系统往往是十分脆弱的。而星罗棋布的燃料电池加入到电网中供电将会大大提高电网的安全性。在某个远距离的基本负荷电源跳闸时,燃料电池可以对电网起到一定的支撑作用,保证重要用户的电能需求。随着 SOFC 技术的突破、天然气管线的铺设和大型煤气化技术的解决,届时人们会看到对于大规模的应用化石能源的电力系统来说,变长距离输电为长距离输气,应用大、中、小相结合的各种燃料电池靠近负荷供电、供热的系统会更经济、更安全。

2 能量转化的方向性原则

能量与物质是密不可分的。能量的转换往往也伴随着物质的变化。这种变化既可以是微观粒子状态的变化,也可以是大量分子的集体行为,即宏观状态的变化。

正如爱因斯坦所言,能量与物质是密不可分的。能量的转换往往也伴随着物质的变化。这种变化既可以是微观粒子状态的变化,也可以是大量分子的集体行为,即宏观状态的变化。对于涉及能级跃迁、原子核重组等基本概念的太阳能、核能技术而言,量子力学是其理论基础;而对于涉及化学反应、相变化的电池技术、热动力技术以及机械能、电磁能转化技术等宏观层次的能量转化技术而言,热力学无疑是其核心的理论基础。热力学的学习经常是工科大学生学习的难点,这是因为其公式往往要在满足附加条件时才成立。本章将主要对著者多年学习热力学的体会进行解说,以帮助读者理解 SOFC 所需要的热力学知识。

2.1 热力学第一定律回顾

时代发展到今天,能量守恒的概念已经深入人心,成为一般的常识。简单地说,对于一个封闭体系而言(热力学上把研究的对象称为体系,而封闭体系是指该对象与其外部环境没有物质的交换),其对外界放出的热能和做出的功来源于其内部能量的减少。由于定义吸热为正,放热为负,所以体系对外放热可记为 $-Q$,体系对外做功记为 W ,将内部能量简称为内能,记为 U ,将其变化记为 ΔU ,则热力学第一定律可以表达为:

$$W - Q = -\Delta U \quad (2-1)$$

或者

$$\Delta U = Q - W \quad (2-2)$$

式(2-2)也可以这样解释,即体系内能的增加来源于所吸收的热能减去对外