



能源与环境出版工程

总主编 翁史烈

固体燃料电池技术

Technology of Solid Oxide Fuel Cells

韦文诚 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



能源与环境出版工程

总主编 翁史烈

固体燃料电池技术

Technology of Solid Oxide Fuel Cells

韦文诚 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书是作者在台湾大学执教期间(1989—迄今)对燃料电池的研究成果汇编而成。内容包含燃料电池科技的基础背景知识,兼顾材料、机械、化工及电机4个领域的相关知识,由浅入深,详细说明。

本书适用于能源专业、机械专业的本科生作为教材使用,也可供专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

固体燃料电池技术/韦文诚著. —上海:上海交通大学出版社,2014

ISBN 978-7-313-11833-2

I. ①固… II. ①韦… III. ①固体电解质电池—燃料电池

IV. ①TM911.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第216850号

固体燃料电池技术

著 者: 韦文诚

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 苏州市越洋印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

字 数: 399千字

版 次: 2014年10月第1版

书 号: ISBN 978-7-313-11833-2/TM

定 价: 89.00元

地 址: 上海市番禺路951号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 21.25

印 次: 2014年10月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-68180638



能源与环境出版工程 丛书学术指导委员会

主 任

杜祥琬(中国工程院原副院长、中国工程院院士)

委 员(以姓氏笔画为序)

苏万华(天津大学教授、中国工程院院士)

岑可法(浙江大学教授、中国工程院院士)

郑 平(上海交通大学教授、中国科学院院士)

饶芳权(上海交通大学教授、中国工程院院士)

闻雪友(中国船舶工业集团公司 703 研究所研究员、中国工程院院士)

秦裕琨(哈尔滨工业大学教授、中国工程院院士)

倪维斗(清华大学原副校长、教授、中国工程院院士)

徐建中(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

陶文铨(西安交通大学教授、中国科学院院士)

蔡睿贤(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

能源与环境出版工程 丛书编委会

总主编

翁史烈(上海交通大学原校长、教授、中国工程院院士)

执行总主编

黄 震(上海交通大学副校长、教授)

编 委(以姓氏笔画为序)

马重芳(北京工业大学环境与能源工程学院院长、教授)

马紫峰(上海交通大学电化学与能源技术研究所教授)

王如竹(上海交通大学制冷与低温工程研究所所长、教授)

王辅臣(华东理工大学资源与环境工程学院教授)

何雅玲(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室主任、教授)

沈文忠(上海交通大学凝聚态物理研究所副所长、教授)

张希良(清华大学能源环境经济研究所所长、教授)

骆仲泐(浙江大学能源工程学系系主任、教授)

顾 璠(东南大学能源与环境学院教授)

贾金平(上海交通大学环境科学与工程学院教授)

徐明厚(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室主任、教授)

盛宏至(中国科学院力学研究所研究员)

章俊良(上海交通大学燃料电池研究所所长、教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院院长、教授)

总 序

能源是经济社会发展的基础,同时也是影响经济社会发展的主要因素。为了满足经济社会发展的需要,进入 21 世纪以来,短短十年间(2002—2012 年),全世界一次能源总消费从 96 亿吨油当量增加到 125 亿吨油当量,能源资源供需矛盾和生态环境恶化问题日益突显。

在此期间,改革开放政策的实施极大地解放了我国的社会生产力,我国国民生产总值从 10 万亿元人民币猛增到 52 万亿元人民币,一跃成为仅次于美国的世界第二大经济体,经济社会发展取得了举世瞩目的成绩!

为了支持经济社会的高速发展,我国能源生产和消费也有惊人的进步和变化,此期间全世界一次能源的消费增量 28.8 亿吨油当量竟有 57.7% 发生在中国! 经济发展面临着能源供应和环境保护的双重巨大压力。

目前,为了人类社会的可持续发展,世界能源发展已进入新一轮战略调整期,发达国家和新兴国家纷纷制定能源发展战略。战略重点在于:提高化石能源开采和利用率;大力开发可再生能源;最大限度地减少有害物质和温室气体排放,从而实现能源生产和消费的高效、低碳、清洁发展。对高速发展中的我国而言,能源问题的求解直接关系到现代化建设进程,能源已成为中国可持续发展的关键! 因此,我们更有必要以加快转变能源发展方式为主线,以增强自主创新能力为着力点,规划能源新技术的研发和应用。

在国家重视和政策激励之下,我国能源领域的新概念、新技术、新成果不断涌现;上海交通大学出版社出版的江泽民学长著作《中国能源问题研究》(2008 年)更是从战略的高度为我国指出了能源可持续发展的健康发展之路。为了“对接国家能源可持续发展战略,构建适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台”,我们策划、组织编写了这套“能源与环境出版工程”丛书,其目的在于:

一是系统总结几十年来机械动力中能源利用和环境保护的新技术新成果;

二是引进、翻译一些关于“能源与环境”研究领域前沿的书籍,为我国能源与环境领域的技术攻关提供智力参考;

三是优化能源与环境专业教材,为高水平技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书或教学参考书,满足人才培养对教材的迫切需求;

四是构建一个适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台。

该学术丛书以能源和环境的关系为主线,重点围绕机械过程中的能源转换和利用过程以及这些过程中产生的环境污染治理问题,主要涵盖能源与动力、生物质能、燃料电池、太阳能、风能、智能电网、能源材料、大气污染与气候变化等专业方向,汇集能源与环境领域的关键性技术和成果,注重理论与实践的结合,注重经典性与前瞻性的结合。图书分为译著、专著、教材和工具书等几个模块,其内容包括能源与环境领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也包括能源与环境工程一线的理论 and 实践。如钟芳源等撰写的《燃气轮机设计》是经典性与前瞻性相统一的工程力作;黄震等撰写的《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》和王如竹等撰写的《绿色建筑能源系统》是依托国家重大科研项目的新成果新技术。

为确保这套“能源与环境”丛书具有高品质和重大的社会价值,出版社邀请了杜祥琬院士、黄震教授、王如竹教授等专家,组建了学术指导委员会和编委会,并召开了多次编撰研讨会,商谈丛书框架,精选书目,落实作者。

该学术丛书在策划之初,就受到了国际科技出版集团 Springer 和国际学术出版集团 John Wiley & Sons 的关注,与我们签订了合作出版框架协议。经过严格的同行评审,Springer 首批购买了《低铂燃料电池技术》(*Low Platinum Fuel Cell Technologies*),《生物质水热氧化法生产高附加值化工产品》(*Hydrothermal Conversion of Biomass into Chemicals*)和《燃煤烟气汞排放控制》(*Coal Fired Flue Gas Mercury Emission Controls*)三本书的英文版权,John Wiley & Sons 购买了《除湿剂超声波再生技术》(*Ultrasonic Technology for Desiccant Regeneration*)的英文版权。这些著作的成功输出体现了图书较高的学术水平和良好的品质。

希望这套书的出版能够有益于能源与环境领域里人才的培养,有益于能源与环境领域的技术创新,为我国能源与环境的科研成果提供一个展示的平台,引领国内外前沿学术交流和创新并推动平台的国际化发展!

肖史烈

2013年8月

序 一

打从韦教授从美国转回台大任教至今,与其相识将近 20 年,看着其在研发领域多采多姿,从陶瓷粉体与纤维合成技术到胶体制造工程技术应用于生物医学材料制作与 3C 被动组件研究,再到制造复杂程度高的陶瓷射出成型技术、陶瓷加工技术与其相关陶瓷制造技术均有深入研究探讨,誉为陶瓷的先行者一点也不为过。

作者古道热肠,雍容豁达的性格,在我们一起服务陶业学会期间表现无遗,不仅将学会内业务推动顺畅,期间针对燃料电池主题还在台湾大学内举办国际研讨会,邀请不少国际级大师莅临指导与演讲,让岛内研究学者受益匪浅,让像我一样在陶瓷业界的人更是大开眼界,更明白能源科技是未来必须走的路,能源陶瓷是未来更要走的宽广大路。作者在繁忙之余,更是挤出时间,毫无私心地跨校教授电子显微镜的微结构分析技术,采取理论教学与实务操作并进方式传授,给一般想学却苦无路径的年轻研究学者与研究生,进入此陶瓷晶体分析的奥妙领域。

因缘际会之下,作者从 2000 年开始逐渐转型做能源陶瓷研究,主攻固体燃料电池,研究硕果累累,至今将其收集到资料与研究成果,尽情分享,著作成书,十年磨一剑,其功力更不可忽视,更是陶瓷界的一大贡献。内容包含能源来源、电化学原理、热力学、材料学、陶瓷制程、物理陶瓷、陶瓷微结构、固态高温燃料电池设计、测试与应用等相关技术,不仅针对材料特性进行介绍,还包含自身研究成果与经验,扩充到燃料电池设计与应用,可让想要一窥固体燃料电池的人缩短入门时间,更可以让系统设计的人更容易跨进此领域,了解固体燃料电池门坎与障碍在何处。

小弟不才,笔秃言拙,无法精妙细数相关概要,但是乐于推荐此书,让

有志了解此领域的有缘人,不要错过此本书,能一起进入宝山,必能满手而出。

江德生

前陶业研究学会第十届理事长

现任富源磁器公司总经理

序 二

近年来,因环境污染所造成的温室效应导致各地气候变化剧烈,再加上环保意识高涨,世界各国正努力发展并提倡零污染的电力供应设备。目前许多国家都持续投入高额的经费和研发人力,研发有关于氢能和燃料电池的相关领域。燃料电池具有高效率、低污染、无噪音、不需充电、无燃烧过程、无任何机械马达转动的零件等优异性能,另一特点是它可以 24 小时运作,不像太阳能或风力等绿能设备,晚间或无风便无法发电,目前已被公认为 21 世纪最重要的新能源技术之一。其发展至今已有 150 余年历史,最常见的种类将近 10 种,其中固体氧化物燃料电池(SOFC)是目前所有的燃料电池中转换效率最高的能源技术,若将 SOFC 加上蒸汽轮机再加上热泵系统的总能量,全部能源转换效率可高达 85%,甚至更高。因其是高或中温型燃料电池,不需要使用贵金属当催化剂,大幅降低其造价;另外,此类燃料电池可使用一般的碳氢化合物如天然气等做燃料,相较方便且成本也较低廉。跟其他燃料电池相较,虽然 SOFC 燃料电池也被开发应用在汽车、卡车、飞机、及轮船等运输工具中的辅助电源 APU 系统,但其在定置型的应用上具有绝对优势,如用作小型的家庭、办公楼、及小区等的热电共生装置(CHP),还可应用于大型的分布式发电站。SOFC 燃料电池的心脏是将气体反应的化学能直接转换成电能的“电池堆”,电池堆中除金属连接板外,其他包括阴极、阳极、电解质与封装材料皆为陶瓷体。由多元材料所整合而成的电池堆,其在高温操作及冷热循环下的热膨胀匹配性、化学稳定性及整体机械结构性,决定了电池堆的功能特性及使用寿命。因此了解 SOFC 材料、单元电池制作,及电池堆组装技术,是成功研发或制作 SOFC 心脏,甚至燃料电池系统的关键因素。

本人认为韦文诚教授针对台湾 SOFC 燃料电池的图书的缺乏,为了帮助各界加深对 SOFC 的了解,花了许多时间完成这本内容丰富的书,令人钦佩。本人熟识韦教授 20 年来,他一向治学严谨,无论是授课还是在指导研究生上绝不马虎,为一力求完美的学者,亦是本人学习效仿的对象。韦教授是国内陶瓷领域的专家,从事 SOFC 研究多年,从理论到实务钻研颇深,且在台大担任陶瓷教学多年,深知 SOFC 未来走向,此书《固体燃料电池技术》由韦教授来执笔实在适合不过了。在书中可见韦教授谨慎的影子加上精准清晰的阐述解析,使其简洁有特色,发觉它真是一本理论与实务兼备的书。本书分成主要 4 个部分,包括导论、SOFC 燃料电池原理、SOFC 材料设计及电池的测试及应用。涵盖了材料、工艺、组装、检测与应用相关知识。以第 3 部分固体氧化物燃料电池内容举例,从材料的结构与缺陷化学、配方设计到制程都有深入浅出的叙述。本书汇整了大量文献的精华组合而成,内容配合很多图表及简要的方程式来说明,生动地阐述了燃料电池的基本工作原理、电化学特性和应用等内容,对想从事这方面研发的工程师来说,可以满足理论到实务的摄取,有助于提高和丰富相关研究人员的理论背景及研究水平;对莘莘学子而言,能减少研习此门学问的摸索时间亦能奠定对此领域的专业基础知识,是从事 SOFC 燃料电池的研究及生产的工程师所必读,也是学校里值得修读的一本教科书。

本人认为本书为台湾第一本浅显易懂的专业燃料电池图书,内容由浅入深,循序渐进的引出 SOFC 燃料电池的要点,可称为燃料电池界的经典之作,难得一见的最佳参考书籍。故强力推荐本书作为岛内外大专院校的参考书籍之用。

王锡福教授

兼台北科大副校长

兼中华民国陶业研究学会第十二届理事长

序 三

人类文明的第一标志性事件是火的利用。文明的发展则与利用的燃烧温度直接相关。土器、陶器等出现,使文明的程度逐渐提高,并且随之而来的瓷器演变成了我们的国名。随着风箱技术的发明和不断完善,人类可以驾驭的热能温度越来越高,促进了冶金业的发展,从而有了青铜时代和铁器时代。现代工业革命的代表无疑是蒸汽机的发明,力大无穷的机器超越了人力、畜力,甚至水力、风力,从而引发一系列的发明与创造,奠定了现代文明的基础。

然而,燃烧过程是一个强烈的不可逆过程。其在提供极大功率的同时,伴随着有效能的极大浪费。从这个意义上说,排除燃烧过程而将化学能直接转化为电能的燃料电池,是人类文明进程中的又一次深刻的革命。燃料电池的能量转化效率高,本身就意味着节能和 CO_2 的减排。摒弃燃烧过程还意味着 NO_x 和 SO_2 的根除。若能以氢能为能源,则只排放水的燃料电池无疑是最为洁净的理想发电装置。

在燃料电池的家族中,有一种固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)。其效率高于其他类型的燃料电池,而且对燃料不挑剔,各种各样的燃料(如甲烷、煤气、甲醇、酒精、生物质气等)都可能使用,因而非常便于推广应用。特别要指出的是,SOFC 绝不仅限于化石燃料时代;SOFC 的逆运行装置——以风能、太阳能等可再生能源发电制氢的固体氧化物电解池(Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC)能够为解决氢能的来源问题做出积极的贡献。

近年来,随着 Bloom Energy 公司在 SOFC 产业化方面的开拓性工作初见成效,加之发达国家的其他众多公司、研究机构,以及全球 SOFC 科技人

员的不懈努力,我们已经感受到了该技术的春天的气息,听到其即将实用化的脚步声。在这样一个令人振奋的时刻,有幸为令人尊敬的韦文诚教授的著作的简体版作序,实在是我极大的光荣。

韦教授是台湾大学教授,学识渊博。从结构陶瓷到功能陶瓷再到 SOFC 的电解质、密封材料等,他都进行了深入的研究。同时他又是一位具有多年丰富教学经验的前辈,以其生动、朴实的语言,把科学的原理言简意赅地加以阐述和表达。本书首先以丰富的文献综述为素材,就 SOFC 的材料、电池结构、燃料处理、电堆与系统集成等各个方面进行了综合的讨论。书中不时穿插一些趣味专栏,犹如知识长河岸边的一处处优美风景般令人回味;每章末尾还配以若干习题和思考题,引导读者复习的同时启发我们独立思考,这对研究生的指导具有极其重要的意义。迄今为止,SOFC 领域已经产生了数本优秀的参考书,但本书以循循善诱的风格独树一帜,尤为珍贵。

众所周知我国能源供应与环境保护需求之间的矛盾已经异常尖锐。大量进口能源的现实也带来了能源安全的悬念。高效、环保的 SOFC 技术恰好又依赖于稀土氧化物材料,而这正是我国的强项。个人认为 SOFC 是上天赐予中国人的珍贵礼物,在中华民族努力实现伟大复兴的中国梦的时代,这个礼物真是雪中送炭。中国梦是和谐发展的梦,节能减排实现人与环境的和谐,共同发展实现人与人的和谐。韦教授的专著能为大陆学子所用,正是两岸携手共同实现中华民族伟大复兴梦想的一个生动的实例和历史的脚注。

王绍荣

上海硅酸盐研究所教授

2014 年 7 月 1 日 于上海

自序

台湾有 99.7% 的能源来自国外,其中 80% 的能源依赖化石能源;海峡的对岸也不惶多让,超过 50% 的能源依赖进口,而且 80% 的能源来自煤炭。两地的政府都有决心要发展绿色能源,而且是可再生的能源,但经过估算,即使再过 20 年,也无法达成北欧各国绿色能源的预期目标,就是绿色能源比例要超过 20%,这要政策、企业、全民的共同努力才能达到。更何况绿色电力(太阳能、风力)的成本还是很高,比传统的电力高出 5~15 倍,台湾的经济发展如果要以绿色能源为主,就会被这种高电价的绿色电源思维所限制住。什么是合理的能源发展?大家的思维是否应该朝着下面几个主题来思考:

什么是合理的电力成本?是否以目前发电的设备成本为计算标准?

我们能源工业发展的强项是什么?零件组装业精进到系统业,在能源产业领域我们也有机会吗?

我们应该有的短(5 年)、中、长期(10 年以上)的能源经济策略是什么?

德国及美国是两个能源强权,现在是阿拉伯联盟。能源的主题在 21 世纪尤其重要,金砖五国(BRIIC)都要进行现代化的发展,都希望将能源板块重新组合,目前除了俄罗斯能够脱困,其他 4 个国家会将这个世界仅有的能源在 40 年内用光!这是恶梦,还是中东国家与能源强权国家间想要散布出来的假象?

在 21 世纪的第一个 10 年,雷曼兄弟公司因连动债破产,但主要生成的原因是石化燃料飞涨的价格,让全球的经济在 3 个月的时间就濒临崩溃,过高的油价使 2008 年 10 月之后的半年全球陷入萧条。虽然半年之后各地经济很快复苏,但又碰到日本的核灾,民间团体马上提出问题,要核能?还是

发展新能源技术？但美国、日本、欧洲大陆都有自己的经济发展问题，各国政府手忙脚乱，“能源短缺”的问题又放诸脑后，短时间不会受到重视。

1970 年使用煤炭进行火力发电成为美国能源安全政策，美国利用其国际影响力，在过去 40 年对全球其他国家强力推销美国的煤炭火力发电技术。另一项高排气量汽车的发展，也都陷在汽车大厂设定的游戏规则之中，只讨论汽车里程效率。因为新的汽车节能技术，例如油电引擎都赶不上日本及德国，美国的汽车工业渐渐萎缩，除了还保有销售通路之外，美国汽车工业科技技术还在制造高排气量(2 000 cc 以上)的豪华车。一旦油价上涨，二氧化碳暖化议题一再被激化，这些不合时宜的耗能设计自然要被取代。

1999 年暑假，有个交流的机会，我们(包括两个研究生)到德国纽伦堡大学(Univ. of Erlangen-Numburg)访问一个月，其中一个目的就是和材料系的 Greil 教授和 Roosen 教授建立研究合作的关系。之后，就有 3 个研究生分成 3 个梯次到纽伦堡大学进行合作研究，他们是林庆章、杨志忠和陈彦友，后面两位博士生进行的博士论文就和固体燃料电池有关。

距离纽伦堡市 10 余公里的 Erlangen 镇只有两个大单位，一是西门子总部，另一就是纽伦堡大学。两个单位关系密切，合作无间。纽大的材料系有些计划也来自西门子公司，约 10 年前西门子已经将美国西屋公司的燃料电池发电部门买下，全力发展管状高温燃料电池(tubular solid oxide fuel cells)系统，而且决定停止平板型(planar type)电池的发展。德国燃料电池的技术领先其他国家，集中管状燃料电池的发展以提供定置型 SOFC 为主；在亚洲，日本在 NEDO 的支持下，由京都陶瓷公司领军，进行 1 kW 的家庭燃料电池的试用计划，5 年的时间，超过一万个家庭试用制作的燃料电池组，包括热回收后，以高出 80% 的能源总使用率，为日本省下许多能源。

在台大经过 10 年持续地进行燃料电池的研究，陆续发表 20 几篇的论文，都是以英文撰写，这些论文即使是台大的学生也都无法全部消化，因此陷入是否要以英文写出教材的长期考虑之中。之后在 2010 年 9 月，第一次将研究的内容做成上课教材，而且开出《SOFC 的原理与应用》一门课给大三到硕一的学生选修。经过三次上课，除了修正上课内容，在 2012 年初决定要将书写出来，而且以中文写出，在台湾及大陆出版，提供有志进入能源

产业的年轻人做为学习的数据,毕业后进入能源领域服务,为能源世纪做准备。

课程内容以写给修过材料、机械领域的学生为目标,如果修过《材料科学》、《能源材料》,或是机械领域的《能源工程》的学生可以自修。课程内容包括固体燃料电池(SOFC)的构造,固体电解质和电极的工作原理,SOFC及类似燃料电池的测试,定置型及便携式电池的应用等。如果可以透过课程讲授,学生和老师的教学互动,可以更深入了解相关节能、减碳技术,SOFC操作优化,甚至经过设计的议题,讨论并关心国家永续能源发展的政策。

这门课还有4个实验,用以了解一般电池的操作原理及如何检测SOFC。我们已在过去3年的课程中,要求我的研究生练习这4项实验,若读者有兴趣请进入我们的网站,可以看到他们的实验示范。这些实验内容要感谢下面几位同学的示范,林廷谕,刘立德,赖佑玮,黄德荣。另外,第一版的文稿每篇都有一位到两位研究生先试读,找出拗口文句或错字,供改写出内文的参考。另外,还要感谢吴荣源博士、杨登钧博士、王兴华教授、江德信董事长的宝贵意见,对这个版本内容的指教,因此作者对本教材的正确性及词意的掌握有信心,读者若还发现有错别字,请不吝指教,来信通知 wjwei@ntu.edu.tw。

台湾地区的能源产业过去以发电(台电)和提炼油品(中油)为主,近几年汽电共生(例如台塑)的产业也有新的进展。这几个行业营业额高,职工福利好,薪资更没话说,是很多工程领域毕业生的第一首选。如果从国家人才发展的角度来看,这些公、私机构能找出新的能源产业,扩充人才需求,就能够推动重要产业的发展,推动适才适所的目标。

未来的能源技术以可持续、实用、低成本为评判技术是否应该发展的条件,期勉政府、企业在未来10年一定要参与这个崭新的能源时代,年轻学子们找出自己的兴趣,先做准备,迎接这个能源世纪。

韦文诚

2013年7月3日