



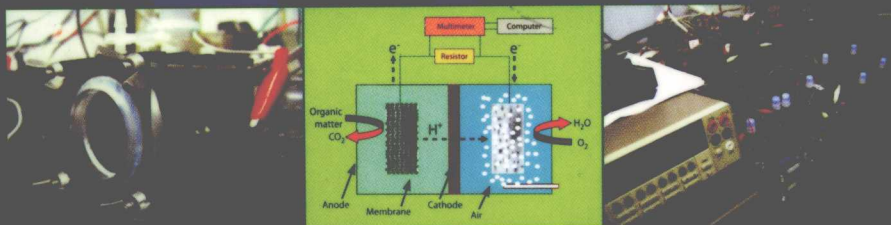
国外优秀科技著作出版专项基金资助

微生物燃料电池

MICROBIAL FUEL CELLS

[美] 布鲁斯·洛根 (Bruce E. Logan) 著

冯玉杰 王鑫 等译



化学工业出版社



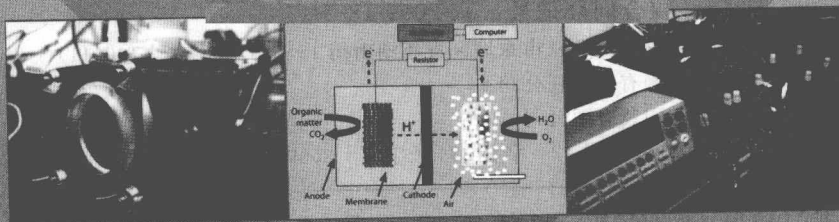
国外优秀科技著作出版专项基金资助

微生物燃料电池

MICROBIAL FUEL CELLS

[美] 布鲁斯·洛根 (Bruce E. Logan) 著

冯玉杰 王鑫 等译



化学工业出版社

·北京·

本书首先对微生物燃料电池的基本原理、种类和应用前景进行了简要概述。在随后的章节中,作者详细介绍了与微生物燃料电池密切相关的产电菌、电压的产生、能量的产生、微生物燃料电池所需的材料、反应器构型以及反应动力学与质量传递等,并对微生物燃料电池在废水处理中的应用效果以及技术的发展前景做了详细论述。本书不但给出了微生物燃料电池系统的模型、设计和工艺,还选择了一些应用实例对其进行说明,使读者对微生物燃料电池技术有更深入的了解。

英文原著是迄今为止国际上专门介绍微生物燃料电池的第一本专著,本书是在我国首次面市的中文版此类书籍。书中内容深入浅出,通俗易懂,实用性强,是一本全面介绍微生物燃料电池技术及其潜在发展趋势的权威著作,不仅可作为从事相关研究工作人员的有价值的参考书,还可作为相关领域研究生的教学参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

微生物燃料电池/[美]洛根(Logan, B. E.)著;冯玉杰,王鑫等译. —北京:化学工业出版社, 2009. 8
ISBN 978-7-122-05963-5

I. 微… II. ①洛…②冯…③王… III. 微生物燃料电池
IV. TM911. 45

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第098463号

MICROBIAL FUEL CELLS/by Bruce E. Logan

ISBN 978-0-470-23948-3 (cloth)

Copyright©2008 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

本书中文简体字版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分,违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2009-1881

责任编辑:徐娟

文字编辑:糜家铃

责任校对:洪雅妹

装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张12 字数234千字 2009年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00元

版权所有 违者必究



前言

本书是基于几年来我和我的许多同事在实验室的工作和经验整理而成的。但说到我在胞外电子传递方面获得知识的起源，则需要上溯到 20 年前。1986 年，我开始和 Bob Arnold 以及他的课题组学习金属还原菌相关知识，当时我和 Bob 都还是亚利桑那大学的助理教授。Bob 是固体铁氧化物还原细菌领域的早期开拓者，我非常感谢 Bob 和他的学生（特别是 Flynn Picardal）与我共享他们的工作，并多年来与我一起探索这些令人着迷的细菌。

2002 年秋，我有幸与 Hong Liu 一起开始微生物燃料电池（MFC）的研究工作。Hong Liu 当时是我课题组的一位博士后，她为我实验室中 MFC 研究方向做出了极具创新性和学术性的贡献。在她的努力和激励下，这个课题在我的实验室得到了快步的发展，并在短时间内获得了许多有趣的发现。从我开始 MFC 工作的这些年以来，我有幸与许多充满智慧的研究者一起工作。我特别感谢实验室中以下学生和研究者：Shaoan Cheng, Booki Min, JungRae Kim, SangEun Oh, Jenna Heilmann Ditzig, Yi Zuo, Douglas Call, Valerie Watson, Rachel Wagner, Farzaneh Rezaei 和 Defeng Xing。我自己的研究主要集中在生物物理界面上，因此我需要和熟悉化学、生物学和分子生物技术的专家合作。感谢宾州州立大学的 Tom Mallouk 在燃料电池和电化学方面的耐心讲解，同时感谢他的学生 Ramna Ramnarayanan 对我的帮助。我还要特别感谢我在宾州州立大学的合作者 Jay Regan 以及他的小组，因为他们的专业技能和广阔的知识对这项研究非常重要，使我们在宾州州立大学取得了突出的成绩。

与宾州州立大学以外的研究小组合作对于拓展 MFC 研究领域非常重要。在 2003 年，我在纽卡斯尔大学渡过了一个假期。在此过程中，我同 Ian Head、Tom Curtis、Cassandro Murano 以及 Keith Scott 一起工作，受益匪浅。Eileen Wu 在我的小组中与我们持续合作了几个月。此外，我在与 Yuri Gorby (J. Craig Venter 研究院)、Ken Nealsen 和 Orianna Bretschger (南加州大学)，Tim Vogel 和 Jean-Michel Monier (法国里昂中央理工学校)，Yujie Feng 和 Aijie Wang (中国哈尔滨工业大学)，Kazuya Watanabe 和 Shunichi Iichi (日本海洋生物学研究所)，Kyeong-Ho Lim (韩国公州国立大学) 以及其他研究者的合作中也有很大收益。

本书是由 2006 年一篇论文进一步延伸而来的，那篇论文的共同作者有 Peter

Aelterman、Bert Hamelers、René Rozendal、Uwe Schröder、Jurg Keller、Stefano Freguia、Willy Verstraete 和 Korneel Rabaey。关于电压和功率的章节是基于 René 和 Bert 的论文以及 Korneel 和 Uwe 的贡献构思而成的。我特别感谢 René 在热力学、功率计算和 MEC 方面，以及 Korneel 在 MFC 方面额外的努力和持续的讨论。本书中每一章均得到了广大同行的建议并进行了改进，在此我还要特别感谢 René Rozendal、Ian Head、Nathan Lewis、Annemiek ter Heijne、Korneel Rabaey、Ken Neelson、Uwe Schröder、Song Jin、Jurg Keller、Lenny Tender 和 Denny Parker。

我衷心感谢以上提到的每一位对本书的帮助。我期望 MFC、MEC/BEAMR 和生物能源这些令人兴奋领域能够继续获得快速的发展。

Bruce E. Logan
宾夕法尼亚州大学城
2007 年 9 月



译者前言

由于全球化石能源短缺问题以及化石能源在使用和开采过程中对环境的危害,寻求可再生的新能源已引起全世界的关注,微生物燃料电池即是可以实现能量转换及产能的新的概念和装置。利用微生物燃料电池,既可以实现将葡萄糖等简单小分子直接转化成电能,也可以实现将复杂生物质中所蕴含的化学能直接转化成电能,因其既可实现有机废水处理,同时又能将废水中的有机质能量转化成可利用的电能,从而受到了世界各国的高度关注,成为本世纪环境科学与工程研究的热点方向之一。

在世界范围内,微生物燃料电池还是一个崭新且富有挑战性的领域,尽管不断有新的发现和认识被报道,但迄今为止科学家对微生物燃料电池还知之甚少,还有许多关键科学和技术问题等有待研究者去发现。而由于微生物燃料电池系统包含了生物学、电化学、反应工艺等复杂的过程,所以这一发现过程显得极其艰难,可能需要新的理论与方法以支持开展系统研究。

本书英文版由 WILEY 出版社出版。该书是美国宾夕法尼亚州立大学环境工程领域著名学者 Bruce E. Logan 教授所著的第一部全面介绍微生物燃料电池的著作的中文版本,在翻译过程中,译者基本保持了原书的风貌,只是原著中参考文献统一编排在正文后,考虑到读者阅读的习惯和方便,中文译著中将参考文献附在每章后,特此说明。

2006 年,本书译者冯玉杰教授在宾夕法尼亚州立大学访问时, Bruce E. Logan 教授正在进行此书的撰写,在与 Logan 教授交流中,得知他为此书的完成收集了大量的资料,花费了大量心血,同时有幸提早阅读了部分初稿,深感此书对于一名初涉微生物燃料电池研究领域的科研人员来讲,具有很重要的参考作用和价值。于是当时就与 Bruce E. Logan 教授约定,争取尽快将此书介绍给中国读者。感谢化学工业出版社的努力,使得此书在美国正式出版不到两年的时间里,就与我国读者见面。

在开展研究的过程中,我们荣幸结识了本书的作者 Bruce E. Logan 教授,以及一批在此领域从事研究的国内外优秀而充满智慧的学者,在与这些学者的交流中,我们能够感受到众多国内外科学家对于探讨微生物燃料电池新理论及新技术的热情和愿望,也更加体会到专业技能和广阔的知识对这项研究的重要性,这是取得研究

成果的重要基础。本书涉及了目前已经发现的限制微生物燃料电池功率输出的一些重要方面以及从事微生物燃料电池研究必备的一些专业知识，尽管还不足以满足专业研究的全部需求，但却是一本快速掌握微生物燃料电池基础并开展研究的重要著作，相信会对我国学者开展此项研究提供重要参考，这也是我们将此书介绍给国内读者的重要目的。

全书由哈尔滨工业大学冯玉杰教授组织她的博士研究生及博士后人员翻译，并完成全书的最终校订，此书的翻译出版是集体智慧与贡献的结晶。本书第1章和第5章由史昕欣翻译，第2章由李贺翻译，第3章和第6章由杨俏翻译，第4章由刘尧兰翻译，第7章和第9章由王欣翻译，第10章由王赫名翻译，第8章、第11章和第12章由王鑫翻译。刘佳对全书书稿进行了第一次校订，王鑫博士进行了第二次校订，与原书对照，对各章节逐一进行了内容和格式上的订正和梳理，冯玉杰教授最后对全书进行了统稿和最终校订。此外对于艳玲、李冬梅、曲有鹏、刘峻峰等人为此书的翻译出版所做出的贡献表示感谢！

本书在翻译、出版过程中，得到了原书作者 Bruce E. Logan 教授的大力支持，Bruce E. Logan 教授一直十分关注此书的出版，提出了很多宝贵的意见，同时提供了此书的原稿和高清晰插图，在此表示感谢！

本书在翻译出版过程中，得到了城市水资源与水环境国家重点实验室（哈尔滨工业大学）的支持和帮助，在此表示感谢！

最后衷心感谢在本书翻译出版过程中提供过帮助的每一个人！

译者
2009年5月

目录

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 第1章 概论 | 1 |
| 1.1 能源需求 | 1 |
| 1.2 能源及全球气候变化的严峻性 | 2 |
| 1.3 生物产电——微生物燃料电池产电工艺 | 4 |
| 1.4 MFC 与水资源的可持续性 | 5 |
| 1.5 用于废水处理的 MFC 技术 | 6 |
| 1.6 MFC 的可再生产能 | 8 |
| 1.7 MFC 技术的其他应用 | 9 |
| 1.8 参考文献 | 10 |
| 第2章 胞外产电菌 | 12 |
| 2.1 简介 | 12 |
| 2.2 电子转移的机制 | 13 |
| 2.2.1 纳米导线 | 13 |
| 2.2.2 细胞-表面的电子传递 | 16 |
| 2.2.3 中介体 | 16 |
| 2.3 应用已知的产电菌来进行 MFC 研究 | 18 |
| 2.3.1 产电菌在没有外源中介体条件下的产电过程 | 18 |
| 2.3.2 产生电子中介体的胞外产电菌 | 21 |
| 2.4 群落分析 | 21 |
| 2.4.1 阴极室利用氧气的 MFC | 22 |
| 2.4.2 除氧气外的其他电子受体 MFC | 23 |
| 2.4.3 沉积物 MFC | 25 |
| 2.4.4 高温 MFC | 26 |
| 2.5 将 MFC 作为工具研究胞外产电菌 | 26 |

| | |
|----------|----|
| 2.6 参考文献 | 28 |
|----------|----|

第3章 电压的产生

32

| | |
|--------------------|----|
| 3.1 电压和电流 | 32 |
| 3.2 基于热力学关系的最大电压 | 32 |
| 3.2.1 阳极 | 34 |
| 3.2.2 阴极 | 36 |
| 3.3 阳极电位和酶电位 | 37 |
| 3.4 设定阳极电位时群落与酶的作用 | 41 |
| 3.5 发酵细菌的电压产生 | 42 |
| 3.6 参考文献 | 44 |

第4章 能量的产生

46

| | |
|------------------|----|
| 4.1 能量的计算 | 46 |
| 4.2 库仑效率和能量效率 | 49 |
| 4.3 极化曲线及功率密度曲线 | 50 |
| 4.3.1 影响电池电压的因素 | 51 |
| 4.3.2 MFC的内阻 | 53 |
| 4.4 内阻的测量 | 54 |
| 4.5 反应器的化学和电化学分析 | 56 |
| 4.6 参考文献 | 59 |

第5章 MFC材料

61

| | |
|----------------------|----|
| 5.1 寻找廉价、高效的材料 | 61 |
| 5.2 阳极材料 | 62 |
| 5.3 膜和分隔物(化学物质的过膜传递) | 67 |
| 5.4 阴极材料 | 73 |
| 5.4.1 以碳为基体的阴极 | 73 |
| 5.4.2 其他阴极和阴极电解液 | 76 |
| 5.5 不同材料的长期稳定性 | 77 |
| 5.6 参考文献 | 80 |

第6章 MFC构型

83

| | |
|----------------|----|
| 6.1 总体要求 | 83 |
| 6.2 空气阴极 MFC | 84 |
| 6.3 使用溶解氧的液体阴极 | 90 |

| | | |
|------|--------------------|-----|
| 6.4 | 可溶性阴极电解液或恒电位的两室反应器 | 93 |
| 6.5 | 管状填充反应器 | 96 |
| 6.6 | MFC 堆栈 | 98 |
| 6.7 | 金属阴极电解液 | 100 |
| 6.8 | 生物产氢 MFC | 101 |
| 6.9 | 未来可放大的 MFC 结构 | 103 |
| 6.10 | 参考文献 | 103 |

第7章 反应动力学与质量传递 107

| | | |
|-----|------------------|-----|
| 7.1 | 反应动力(质量传递)模型 | 107 |
| 7.2 | 速率常数的边界条件和细菌特性范围 | 108 |
| 7.3 | 单层细菌的最大功率输出 | 112 |
| 7.4 | 传质到生物膜的最大效率 | 114 |
| 7.5 | 单位体积反应堆的传质 | 117 |
| 7.6 | 参考文献 | 118 |

第8章 微生物电解池 120

| | | |
|-----|-----------------|-----|
| 8.1 | 操作原理 | 120 |
| 8.2 | MEC 系统 | 122 |
| 8.3 | 氢气产率 | 124 |
| 8.4 | 氢气回收率 | 125 |
| 8.5 | 能量回收 | 126 |
| 8.6 | 氢损失 | 132 |
| 8.7 | MEC 与 MFC 系统的差异 | 134 |
| 8.8 | 参考文献 | 135 |

第9章 MFC在废水处理中的应用 137

| | | |
|-----|---------------|-----|
| 9.1 | 污水处理厂的工艺流程 | 137 |
| 9.2 | MFC 替代生物处理反应器 | 140 |
| 9.3 | 污水处理厂的能量平衡 | 144 |
| 9.4 | 污泥减量化的意义 | 147 |
| 9.5 | 脱氮除磷 | 147 |
| 9.6 | 产电与产甲烷 | 148 |
| 9.7 | 参考文献 | 150 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 第10章 MFC的其他应用 | 153 |
| 10.1 基于 MFC 技术的其他应用 | 153 |
| 10.2 沉积物 MFC | 153 |
| 10.3 强化的沉积物 MFC | 157 |
| 10.4 使用 MFC 技术进行生物修复 | 158 |
| 10.5 参考文献..... | 160 |
| 第11章 制作属于自己的MFC | 162 |
| 11.1 写给新入门的科研工作者和发明者..... | 162 |
| 11.2 选择接种体和培养基..... | 164 |
| 11.3 MFC 的材料:电极和膜..... | 166 |
| 11.4 便于组装的 MFC 构型 | 167 |
| 11.5 MEC 反应器 | 169 |
| 11.6 MFC 的运行和评价 | 170 |
| 11.7 参考文献..... | 171 |
| 第12章 MFC的展望 | 172 |
| 12.1 MFC 的昨天和今天 | 172 |
| 12.2 MFC 商业化的挑战 | 173 |
| 12.3 成就和展望..... | 174 |
| 12.4 参考文献..... | 175 |

第1章 概论

1.1 能源需求

目前，地球上的人口数量已超过 60 亿，并预计将在 2050 年达到 94 亿 (Lewis 和 Nocera 2006)。在过去的一个世纪里，化石燃料支撑着工业和经济的发展，然而毫无疑问，化石燃料难以维持整个世界的经济。石油预计将在未来的 100 年或更久后枯竭，但是，在未来的 10~20 年内，即在 2015~2025 年之间，石油的需求量将超过石油的产出量 (Rifkin 2002)。对只需为未来的 3~5 年作筹划的个人和企业来说，10~20 年的时间似乎是遥远的，但对整个社会而言，这却只是一个很小的时间区间。例如，计划在一个城市修一条州际高速公路需要 10 年甚至更长的时间，而全球能源需求的结构改革则需要更长的时间。此外，这不仅仅是能源需求结构的改革，而且还是人们生活方式的改革。改革将在人类的一切衣食住行中体现其成效。在未来的几十年中，能源成本及能源价格将控制人类的经济发展和生活方式。

美国每年的能源消耗约为 1.1×10^{15} J (或 100 quads, 100 quadrillion BTU = 10^{15} BTU)，并以 3.34 TW (1 TW = 10^{12} W，下同) 的速度递增，而全世界每年的耗能约为 13.5 TW (Lewis 和 Nocera 2006)。因此，占世界人口仅为 5% 的美国却使用着占世界 25% 的能源。在美国，能源的来源有很多种，但大部分来源于化石燃料燃烧 (见图 1.1)。能源 (600 GW) 中大约有 18% 来源于大型发电厂，而一个典型的火力发电厂可提供约 1 GW 的能源。发电厂的发电效率为 33%，因而能量的利用率为三分之一。

假设美国有 3 亿人，平均每人每年在美国消耗 11.1 kW 或 97 MW·h 的能源，但这个数值并不是日常生活的能源消耗。因为工业生产、交通运输、各种能量转移中的热损失及循环使用需要消耗更多的能量。从大多数居民的生活水平来看，美国平均每户耗电 1.22 kW，加拿大不列颠哥伦比亚省则为 1.5 (非电能)~2.5 kW (电能) (Levin 等 2004)。相对而言，美国平均每人每年需用 500 gal (1 gal = 3.78541 dm³，下同) 天然气，相当于 2.1 kW 的能量。

未来我们需要多少能源？结合现有经济增长水平估计人口增长，按现在能量增长速度计算，到 2050 年全球将耗能 41 TW。然而，考虑到未来能源的发展趋势，更加合理的预计是 2050 年能源需求为 27 TW，而 2100 年能源需求为 43 TW

(Lewis和 Nocera 2006)。

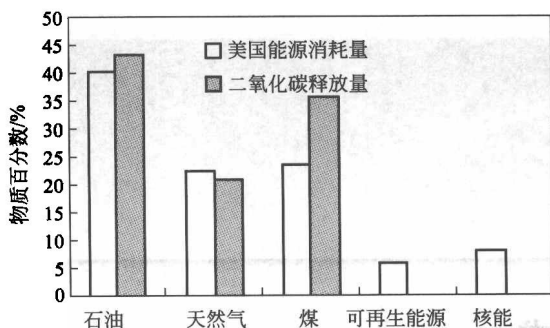


图 1.1 美国各类能源消耗和 CO₂ 排放量的百分比 (5.772×10^9 t)

注：由 Shinnar 和 Cintro 提供 (2006)，美国科学促进会再版许可

1.2 能源及全球气候变化的严峻性

没有一种“魔弹”能够满足现在和未来的能源需求。现天然气和煤依然是主要的能量来源，但这种状况在未来将难以维持。美国在 20 世纪 70 年代第一次爆发能源危机时，解决的办法仅仅是发现新的石油资源。然而，寻找新的石油资源、增加现有石油资源的开采率、使用其他化石燃料如沥青砂、页岩油均无法解决气候变化带来的严峻挑战。毫无疑问，化石燃料中碳的释放使得空气中的 CO₂ 量大幅增加，由 1959 年的 316ppmv 上升至 2004 年的 377ppmv [见图 1.2(a)]。据估计，到 2100 年，各地区 CO₂ 的浓度将达到 540~970ppmv 不等。空气中 CO₂ 的浓度超过了历史上的任何时期，然而人类获取能量的方式并没有实质性的改变。在未来的 40~50 年，全球 CO₂ 的积累将持续保持到 500~2000 年后。因此，目前的 CO₂ 水平不可能在短时间得到改变。全球的气温也创下历史新高 [见图 1.2(b)]，从而导致冰山融化和海平面上升。

石油、天然气的短缺造成其他燃料，如煤、煤焦油、页岩油、沼气的大量使用。然而，如果我们仍沿用常规获取能量的手段，那么将会释放更多的 CO₂，加剧对环境的破坏以及导致全球气候恶化。我们可以捕获 CO₂，并对其进行后续处理，然而这将继续增加其他燃料的释放量。很显然，我们需要一种更有效的方法将 CO₂ 储存起来，这种方法使 CO₂ 在未来一个世纪里以不高于 1% 的平均速率进入空气（全球性的！）（Lewis 和 Nocera 2006）。当然，这种方法要求所有国家 CO₂ 的释放量是均等的，并对碳进行有效的捕捉和封存。

我们所面临的最大的环境挑战是要同时解决能量产出和 CO₂ 的释放问题：我们必须开发一个全新的能量平台，在确保产生足够能量的同时降低 CO₂ 的释放。我们的目标是在保证 CO₂ 底线的同时满足 2050 年的能量需求。

核裂变不是解决问题的方式。据估计铀的总产电量为 100TW·h，因此，如果

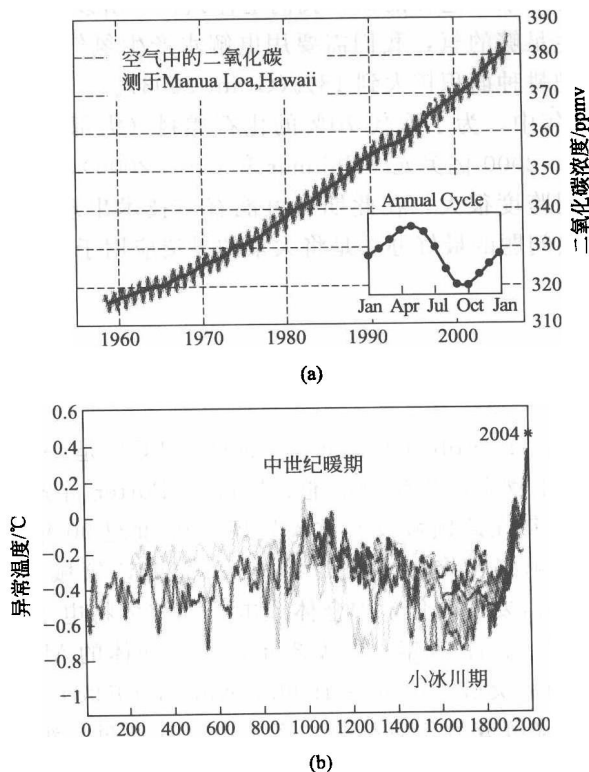


图 1.2 (a) Manua Loa 地区 CO_2 在大气中的浓度 (Wikipedia-Contributors 2007a);
(b) 历史上各年份的相对温度 (Wikipedia-Contributors 2007b)

利用铀产生 10TW 的电，那么铀矿将在 10 年内枯竭。为此，我们需要在未来的 45 年中平均每 1.6 天建一个 1GW 的发电厂 (Lewis 和 Nocera 2006)。这项假定甚至还没有包括开采铀矿给环境和人类带来的损失，以及长期储存核废物导致的不安全因素。

利用太阳能是最终的长期解决办法，但是，其使用依赖于人类如何获得这部分能量。目前我们每年仅使用了太阳照射地球能量 ($4.3 \times 10^{20} \text{J}$) 中的一个小时。日照不是全天都有，而且各个地区的日照情况也不相同，并且，太阳能光板只能在白天对用电需求起帮助作用。因此，只有当掌握了有效的能量储存方法时，太阳能才能作为主要能源供全天使用。电解水产氢是一种有效的途径，由于电解的效率，氢燃料电池产电效率可接近 80%，目前的产电效率已达到 50% (Grant 2003)。

生物质能源是太阳能的另一种转化形式，具有将太阳能在生物体内储存、富集以及利用生物质传递等特点。Shinnar 和 Citro (2006) 为非化石燃料应用提供了一个技术路线，即在未来的 30~50 年内依靠适合的技术，包括太阳能技术、地热技术、风能技术、氢能和核能技术等产能。在美国大约 15% 的土地用于耕种，且大部分用于食物的生产 (Grant 2003)。这些作物具有约为 2.6TW 的能量，显然这不

足以满足现有的能源需求（这样的话，我们吃什么？）。所以，为了满足我们现有的交通运输能耗而产生足够的氢，我们需要用电解水产生氢气的方法来提供 0.4TW 的能量，这相当于把耕种面积扩大到 18% (Grant 2003)。

在未来的 30 多年中，为了取代 70% 的化石燃料（大部分为煤炭资源），我们每年需花费 1700 亿~2000 亿美元 (Shinnar 和 Citro 2006)，这个经济学数字是难以实现的。由于时间跨度很大，在此期间可能有新技术出现来改变这个数字。因此，解决能源和气候问题的最好办法是将大量的投资应用于可再生能源的研究和发展上。

1.3 生物产电——微生物燃料电池产电工艺

微生物燃料电池 (microbial fuel cell, 简称 MFC) 是一种产生电能的新方法——利用细菌通过生物质产生生物电能。1911 年 Potter 首先发现能利用细菌产生电流，但此后的 55 年在该领域没有重大发现。20 世纪 90 年代初，燃料电池开始受到人们的关注，越来越多的工作开始投入到 MFC 领域 (Allen 和 Bennetto 1993)。但是，实验中需要使用化学中介体或电子穿梭体将电子从电池内部传递至外部电极 (详见第 2 章)。1999 年人们发现不添加中介体的 MFC 也能产电，从而在 MFC 领域取得了重大突破 (Kim 等 1999c; Kim 等 1999d)。

MFC，即微生物降解或氧化有机物，产生电子并通过一组呼吸酶在细胞内传递，以 ATP 形式为细胞提供能量。电子进而被释放给最终电子受体 (terminal electron acceptor, 简称 TEA)，TEA 得到电子后，自身被还原。例如，氧气通过电子、质子的催化反应被还原为水。很多电子受体如氧气、硝酸盐、硫酸盐等均能通过扩散作用进入细胞得到电子生成还原产物，再从细胞扩散出来。但是，最近人们发现某些细菌可将电子导出细胞外，从而通过 MFC 系统产生电能。在产甲烷体系中，其工艺过程、微生物体系和反应器命名为：甲烷生成过程、产甲烷生物、厌氧消化池。类似地，可用这种方法定义 MFC 中的系列名词：产电过程、产电菌及微生物燃料电池 (MFC) 反应器。

MFC 系统组成示意图 1.3。氧气渗入阳极室内会阻碍产电，因此设计电池时必须将氧气与细菌分开。在两电极间放置一个交换膜可形成两个分开的极室，既可以将氧气与细菌分开，又不影响质子的传递。细菌在阳极生长，而电子在阴极与电解质反应，两极由含负载（即需要供电的设备）的外电路连接，在实验室里使用电阻作为负载。原则上，阳极产生的质子可通过膜渗透到阴极，并与从导线转移到阴极的电子以及氧气反应生成水。实验条件下 MFC 的电流大小由测量电阻两端的电势降低而得，电势降低可使用电压表间歇测量，或者将万用表或恒电位仪与计算机相连后连续采集数据。

利用细菌发电是生物产能的一项重大进步，由于细菌可自我复制，因此氧化有机物的催化剂可由自身提供。细菌根据自身的耐受限度可在多种温度范围内发生反

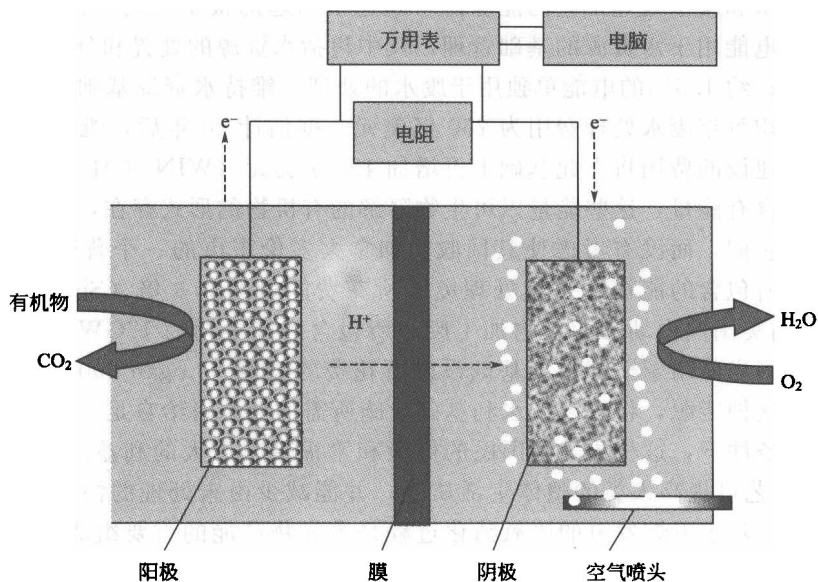


图 1.3 MFC 系统组成示意

注：不按比例。阳极室与阴极室用膜隔开，细菌在阳极上生长，氧化有机物释放电子到阳极，同时释放质子到溶液中。阴极通过曝气提供溶解氧与电子和质子反应。外部由导线和负载完成电路产生电能。此系统采用电阻作负载，使用万用表与数据采集系统相连来测定电流及功率大小

应，大多数细菌可在常温（15~35℃）下存活，嗜热菌可忍受 50~60℃ 的高温，而嗜冷菌可在 <15℃ 的低温中生长。许多可生物降解的有机物可用在 MFC 中，包括挥发酸、碳水化合物、蛋白质、酒精及难降解物质（如纤维素）等。

虽然利用 MFC 产电的理论由来已久，但作为一种产能方式却是崭新的。从经济的角度而言，MFC 作为一种产能方法是可行的。目前，原油的价格仍然较低，许多不同的产能方式发展起来并已经逐步提高了自身的竞争力。MFC 则由于刚刚出现，许多廉价的材料还没有被应用于系统结构中。正如本书所强调的，这种情况正在逐步改变，并且许多新方法已用于 MFC 的设计，并取得了可喜的成果。发展一项新技术最快的方法就是将其投入到一个可以获得最大收益的地方进行应用。随着技术的进一步发展，它可以占有新的市场。例如，计算机硬盘在小到如音乐播放器可随身携带之前经过了许多年的发展。类似地，MFC 也应在可创造最大价值的地方发展和使用。由于以下提到的诸多原因，MFC 应该作为一种能源回收和水资源可持续发展方式来获得最初的推广和应用。

1.4 MFC 与水资源的可持续性

地球上超过 20 亿的人口缺乏健全的卫生设施，10 亿人无法获得充足的饮用

水。常规给水和废水处理工艺的能源需求是这个问题的很重要的一部分。在美国, 4%~5%的电能用于水资源的基础管理, 其中包括水资源的处置和分配以及废水的收集与处理; 约1.5%的电能单独用于废水的处理。维持水资源基础管理的花费相当巨大, 平均每年废水处理费用为250亿美元。据估计20年后, 维持和改善水资源基础设施建设的费用将在此基础上再增加450亿美元(WIN 2001)。

废水中含有能量, 这些能量以可生物降解的有机物的形式存在, 而我们正在耗费能量去除它们, 而没有考虑使其回收。加拿大多伦多市的一个普通的污水处理厂, 废水中所包含的能量约是其处理废水所花费能量的9.3倍(Shizas和Bagley 2004)。目前美国国内动物和食物加工废水所包含的能量约为17GW, 这个数值大体相当于美国当前用于全部水利基础设施所花费的能值(Logan 2004)。因此, 如果能够回收这种能源, 将可以使水利基础设施所需的能源自给自足。未来几年在能源不确定的条件下, 这将给美国国民的健康和幸福带来巨大的利益。更重要的是, MFC处理工艺可提高人类的整体生活质量, 并能减少由未处理的污水传播的水源疾病的蔓延。基于甲烷发电的厌氧消化过程是废弃物产能的重要组成部分, 但是, 它们需要相对的高温(36℃)和较长的停留时间, 使得厌氧消化工艺仅适用于高强度废水。

1.5 用于废水处理的MFC技术

MFC技术是一种很有前景的技术。这项技术完全不同于普通废水处理方法, MFC技术从废水中获得能量, 这些能量以电能和氢气的形式存在, 而不是耗电电能。20世纪90年代末, Kim及其同事证实了细菌可被应用于已知浓度的乳酸废水的生物燃料电池中(Kim等1999d), 之后他们又发现使用淀粉工业废水可维持MFC产电(Kim等1999c)。但是, MFC的产能较低, 并且现在还不清楚这一技术对废水的浓度将产生多大影响。直至2004年, 证实了MFC处理生活废水的同时可产生电能后, MFC技术的产电和处理废水的关系才正式确立(Liu等2004)。此研究中的产电功率虽然低(26mW/m²), 但已远远高于(几个数量级)之前所得到的废水产电值。几年前Reimers等(2001)研究发现, 海洋沉积物中的有机质和无机质可用于构造新型MFC, 可以通过多种多样的基质、材料及系统架构利用细菌从有机物中获得电能。但这些研究所得能量均相对较低。MFC决定性的发展要归功于Rabaey等人, 他们证实了利用葡萄糖的MFC在不需添加化学中介质的情况下, 可将功率密度提升两个数量级(2003), 这个发现把人们的注意力吸引到MFC上。

以上的研究发现之后, MFC的实际应用研究接踵而来, 其首要目的在于开发MFC在生活污水、工业和其他类型废水处理中的可放大技术(Logan等2006)。从废水中获得的电能虽然不足以供应给一个城市, 但却足够运转一个处理厂。有效收集这部分电能, 可为水资源的循环利用提供持续的能量来源。请看下面这个中等