



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会推荐出版



Springer

燃料电池技术 ——基础、材料、应用、制氢

[德]彼得·库兹韦尔 (Peter Kurzweil) 著

北京永利信息技术有限公司 译

陈 瑶 韩维文 审

BRENNSTOFFZELLENTÉCHNIK
—GRUNDLAGEN, MATERIALIEN, ANWENDUNGEN,
GASERZEUGUNG 3. AUFLAGE



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专业委员会推荐出版



Springer

燃料电池技术 ——基础、材料、应用、制氢

[德]彼得·库兹韦尔 (Peter Kurzweil) 著
北京永利信息技术有限公司 译
陈 瑶 韩维文 审

BRENNSTOFFZELLENTÉCHNIK
—GRUNDLAGEN, MATERIALIEN, ANWENDUNGEN,
GASERZEUGUNG 3. AUFLAGE



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

燃料电池技术 : 基础、材料、应用、制氢 / (德) 彼得·库兹韦尔 (Peter Kurzweil) 著 ; 北京永利信息技术有限公司译. — 北京 : 北京理工大学出版社, 2019. 9

ISBN 978 - 7 - 5682 - 7622 - 1

I. ①燃… II. ①彼… ②北… III. ①燃料电池 - 研究 IV. ①TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 210521 号

北京市版权局著作权合同登记号图字 : 01 - 2017 - 5479 号

Translation from the German language edition:

Brennstoffzellentechnik

Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung

by Peter Kurzweil

Copyright © Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2016

This Springer imprint is published by Springer Nature

The registered company is Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

All Rights Reserved

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 27.25

字 数 / 443 千字

版 次 / 2019 年 9 月第 1 版 2019 年 9 月第 1 次印刷

定 价 / 149.00 元

责任编辑 / 张鑫星

文案编辑 / 张鑫星

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

第 3 版序言

本德文教科书和参考书受到高等教育与专业实践行业广泛好评。经重新编辑和扩展的第 3 版考虑到读者来信中的建议。新章节“冷却系统”和第 4 章的更新是我与先前的同事 Ottmar Schmid 硕士 (FH) (戴姆勒公司) 合作编写的。

教授 Peter Kurzweil 博士

p.kurzweil@oth-aw.de

2016 年 8 月于安伯格

摘自早期版本的序言

燃料电池——一种散发着无限魅力的技术！激情和创造力促使几代研究人员致力于将化学能源中的原始力量造福于人类。无须通过机械能转换而直接地从化石和无机燃料中获取电力这种实际应用似乎指日可待。然而，距离其大范围部署的技术和经济目标仍存在一定的差距。

燃料电池的历史标志着从 19 世纪末到我们载人航天时代的技术努力。燃料电池可驱动潜艇和电动汽车，为家庭供暖，为航天舱和航天飞机供电。自 20 世纪 50 年代末期起，其在太空轨道和深海中的短时应用开始兴起，并开始在日常生活中与强大耐用的内燃机技术展开竞争。1973 年的石油危机，20 世纪 80 年代的环境法和 1990 年的海湾战争给其进一步发展带来了强大的动力。燃料电池成为未来能源和车辆技术的替代技术。它将过时的化石原料利用与可再生能源迫切需要相结合，直至通过生物质、现有物质和富裕社会所产生的废物进行发电。

无活塞，无运动部件，无燃烧火焰且效率无卡诺限制，那么这种机器是如何工作的？这是一个只能通过跨学科回答的问题。本书针对的是所有学科的学生和实践者，它将把你引入一个化学、物理、过程工程、机械工程和电气工程之间的激动人心的世界。由于燃料电池技术需要应用到广泛的知识 and 跨学科技能，这也使 Grove 和 Ostwald 的早期经验在 150 年后的一般应用中达到顶峰。

条理清晰的排版使初学者和高级用户都能够在说明文字与切合实际的附加信息之间快速切换。资料表则架起了从文本到当前研究的桥梁。通过计算示例充实了基础原理。

常数

光在真空中的速度	c	$= 299\,792\,458$	m/s(精确值)
基本电荷	e	$= 1.602\,176\,565(35) \times 10^{-19}$	C
法拉第常数	$F = N_A e$	$= 96\,485.336\,5(21)$	C/mol
重力加速度	g	$= 9.806\,65$	m/s ² (精确值)
普朗克常数	h	$= 6.626\,069\,57(29) \times 10^{-34}$	J · s
玻耳兹曼常数	$k = R/N_A$	$= 1.380\,648\,8(13) \times 10^{-23}$	J/K
阿伏伽德罗常数	N_A	$= 6.022\,141\,29(27) \times 10^{23}$	mol ⁻¹
标准压力	p^0	$= 101\,325$	Pa(精确值)
摩尔气体常数	$R = kF/e$	$= 8.314\,462\,1(75)$	J/(mol · K)
能斯特电压(25 °C)	$U_N = RT/F$	$= 0.025\,693$	V
	$U_N = \ln 10 \cdot RT/F$	$= 0.059\,159$	V
理想气体的摩尔标准体积			
-273.15 K, 101 325 Pa	$V_m = RT/p$	$= 22.413\,968(20) \times 10^{-3}$	m ³ /mol
-273.15 K, 100 kPa		$= 22.710\,953(21) \times 10^{-3}$	m ³ /mol
-298.15 K, 101 325 Pa		$= 24.465\,40$	L/mol
洛施米德常数	$N_L = N_A/V_m$	$= 2.686\,780\,5(24) \times 10^{25}$	m ⁻³

续表

原子质量单位	$u = \frac{1}{12}m(^{12}\text{C})$	$= 1.660\,538\,921(73) \times 10^{-27}$	kg
真空阻抗	$Z_0 = \sqrt{\mu_0 \epsilon^2} = \mu_0 c$	$= 376.730\,313\,461\dots$	Q(精确值)
电场常数	$\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	$= 8.854\,187\,817\dots \times 10^{-12}$	F/m(精确值)
真空磁导率	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$	$= 12.566\,370\,614\dots \times 10^{-7}$	N/A ² (精确值)
斯蒂芬-玻耳兹曼常数	$\sigma = \frac{\pi^2}{60} \frac{k^4}{h^3 c^2}$	$= 5.670\,373(21) \times 10^{-8}$	W/(m ² · K ⁴)

资料来源:2010 年基础物理常数的国际科技数据委员会(CODATA)推荐值;physics.nist.gov/constants

示例: $R = 8.314\,462\,1(75) \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 应当读为: $R = (8.314\,4721 \pm 0.000\,007\,5) \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

颗粒密度 N/V 和摩尔浓度的转换: $N/V = N_A c$

公式符号

物理量	符号	单位	定义
面积, 横截面	A	m^2	
加速度	a	m/s^2	$a = \frac{dv}{dt} = \dot{v}$
活性 (α 相中的离子 i)	$\alpha_i^{(\alpha)}$	mol/L	$a_i = \gamma_i c_i$
热扩散系数	a	m^2/s	$\alpha = \lambda / (\rho c p)$
磁通密度	$\vec{B}$	$\text{T} = \text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	$F = Qv \times B$
摩尔浓度	b	mol/kg	$b_i = n_i / m_{im}$
电容	C	$\text{F} = \text{C}/\text{V}$	$c = Q/U$
摩尔热容量	C_m	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
比热容	C_p	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$c_p = C_p / m$
摩尔浓度	C	mol/L	$C_i = n_i / V$
电流密度	$\vec{D}$	C/m^2	$\text{div } D = Q/V$
扩散系数	D	m^2/s	$\dot{n} = -DA dc/dx$
距离, 直径, 厚度	d	m	
活化能	E_A	J/mol	$E_A = RT^2 d \ln k/dT$
电场强度	$\vec{E}$	V/m	$E = -\text{grad } \varphi$
电池电压	E	V	$E = E^0 - (RT/zF) \ln K$

续表

物理量	符号	单位	定义
标准电势	E^0	V	$E^0 = -\Delta_r G^0 / (zF)$
可逆电池电压	E_0	V	$E_0 = \Delta E^0 = E_{\text{还原}}^0 - E_{\text{氧化}}^0$
力	F	N	$F = dp/dl = ma$
亥姆霍兹自由能	F	J	$F = U - TS$
频率	f, ν	Hz	$f = T^{-1} = c/\lambda$
吉布斯自由焓	G	J	$G = H - TS$
电导率	G	$S = \Omega^{-1} = A/V$	$G = 1/R$
焓	H	J	$dH = dU + pdV = TdS$
比热值	H_u	J/kg	$H_u = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
比燃烧值	H_o	J/kg	$H_o = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
电流强度	I	A	$H_o = -\Delta_r H$
电流密度	i	A/m^2	$i = I/A$
交换电流密度	i_0	A/m^2	
平衡常数	K	versch.	$K = c_1^{v_1} c_2^{v_2} \dots$
速率常数	k	$(mol^{-1} \cdot m^3)^{n-1} s^{-1}$	$k_{ox} = I / (zFAK)$
电化学当量	k	kg/C	$k = M/zF$
电池常数	k	m^{-1}	$k = d/A$

物理量	符号	单位	定义
传热系数 (特征) 长度	k	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	$\dot{Q} = kA\Delta T$ $= \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
扭矩	l	m	
摩尔质量	M	$\text{N} \cdot \text{m}$	$M = r \times F$ $= \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
质量	M	kg/mol	$M_i = m_i/n_i$
质量流量	m	kg	
质量流量	$\dot{m}$	kg/s	$\dot{m} = \text{dm}/\text{dt}$
粒子数	N	—	$= 1$
物质量	n	mol	$n_i = N_i = NA$
物质流	$\dot{n}$	mol/s	$\dot{n} = \text{dn}/\text{dt}$
反应级数	n	—	$= 1$
功率	P	W	$P = \text{dW}/\text{dt}$
脉冲	$\bar{p}$	$\text{N} \cdot \text{s}$	$p = mv$ $= \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
压力, 分压	p	$\text{Pa} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	$p = F/A = \sum p_i$ $= \text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
热量, 热能	Q	J	$= \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
热流	$\dot{Q}$	$\text{W} = \text{J/s}$	$\dot{Q} = \text{dQ}/\text{dt}$ $= \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
电荷	Q	C	$Q = It$ $= \text{A} \cdot \text{s}$
(有效) 电阻	R	Ω	$R = U/I = Z \cos \varphi$ $= V/A = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
离子半径	r_i	m	
反应速度	r	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	$r = \dot{\xi}/V = \dot{c}/v_i$

续表

物理量	符号	单位	定义
表面积	S	m^2	
熵	S	J/K	$\text{d}S \geq \text{d}Q/T$
视在功率	$\underline{S}$	W	$= \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ $= \text{J/s} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
温度	T	K	基本单位
时间	t	s	基本单位
运输数量	t	—	$= 1$
内部能量	U	J	$= \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
电压	U	$\text{V} = \text{J/A} \cdot \text{s}$	$= \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
(电荷载体的) 移动性	u	$\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$= \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{A}$
体积	V	m^3	
体积流量, 流量	$\dot{V}$	m^3/s	
摩尔体积	V_m	m^3/mol	
速度	$\vec{v}$	m/s	
功, 能量	W	J	$= \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
质量比, 重量百分比	ω	—	$= 1$
电抗	X	Ω	$= \text{V/A} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
摩尔分数, 物质质量比例	x	—	$= 1$
阻抗	$\underline{Z}$	Ω	$= \text{V/A} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
离子电荷, 电化学价	$z, z_{\oplus}, z_{\ominus}$	—	$= 1$
			$Z_i = Q_i/e$

公式中的希腊字母

物理量	符号	单位	定义
电流增益	α	—	$=1$
电化学对称系数	α	—	$=1$
离散度	α	—	$=1$
传热系数	α	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	$= kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
线性热膨胀系数	α	K^{-1}	$\alpha = (dL/dT) / l$
质量浓度	β	kg/m^3	$\beta_i = m_i/V$
质量传递系数	β	m/s	$= m \cdot s^{-1}$
X 电位, 表面电位	χ	V	$\chi = \psi - \varphi$
磁化率	χ	—	$\chi = \mu_r - 1$
层厚度, 膜厚度, 边界层厚度	δ	m	$\delta = (n/2) + \varphi i - \varphi u$
损耗角	δ	rad	$D = \varepsilon_0 \varepsilon E$
介电常数	ε	F/m	$= m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
动态黏度	η	$Pa \cdot s$	$= m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
效率	η	—	$=1$
过压	η	V	$= m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
表面浓度	Γ	mol/m^2	$n = E - E_0 - IR_d$
活度系数	γ	—	$\Gamma = n/A$ $a_i = \gamma_i c_i / c^*$

续表

物理量	符号	单位	定义
体积热膨胀系数	γ	K^{-1}	$\Delta V = \gamma V_1 \Delta t$
电导率	k	$S/m = Q^{-1} \cdot m^{-1}$	$j = \kappa E$ $= m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
等嫡指数	k	—	$= 1$
摩尔电导率	Λ_m	$S \cdot m^2/mol$	$\Lambda_i = \kappa/c_i$ $= kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2 \cdot mol^{-1}$
离子电导率	λ	$S \cdot m^2/mol$	$\lambda_i = z_i F u_i$ $= kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2 \cdot mol^{-1}$
波长	λ	m	$\lambda = c/v$
导热系数	λ	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$	$d\phi = -\lambda (\delta T/\delta t) dA$
渗透率	μ	$H/m = N/A^2$	$B = \mu H$ $= V \cdot s / (Am) = m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
电偶极矩	$\vec{\mu}, \vec{p}$	$C \cdot m$	$p = \int P dV$ $= ms \cdot A$
磁偶极矩	$\vec{\mu}, \vec{m}$	$Am^2 = J/T$	$= m^2 \cdot A$
化学势 (α 相中)	$\mu_i^{(\alpha)}$	J/mol	$\mu_i = (\partial G/\partial n_i)_{T,P,n_j}$ $= m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
电化学势	$\tilde{\mu}_i$	J/mol	$= m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
波数	$\tilde{\nu}$	m^{-1}	$\tilde{\nu} = \lambda^{-1}$
运动黏度	ν	m^2/s	$\nu = \eta/\rho$ $= m^2 \cdot s^{-1}$
化学计量因子	ν_i	—	$(\text{组分 } i)$ $= 1$
立体角	Ω	sr	$\Omega = A/r^2$ $= 1$
角频率, 角速度	ω	rad/s	$\omega = \dot{\phi} = 2\pi f$ $= s^{-1}$
电势, 伽伐尼电位 (Galvani)	φ	$V = J/C$	$= m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
相移 (相位差)	φ	rad	$= 1$

物理量	符号	单位	定义
体积比	φ	—	$= 1$
逸度系数	φ	—	$= 1$
伏打电位差 (Volta)	ψ	V	$= \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
密度	ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\rho = m/V$
比电阻	ρ	$\Omega \cdot \text{m}$	$\rho = RA/d$
机械应力	σ	Pa	$\sigma = dF_n/dA$
表面张力	σ, γ	$\text{N/m} = \text{kg/s}^2$	
表面电荷密度	σ	C/m^2	$= \text{m} \cdot \text{kg}^{-2}$
时间常数	τ	s	$= \text{As} \cdot \text{m}^{-2}$
剪切应力	τ	$\text{Pa} = \text{N/m}^2$	$= \text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
表面占比	θ	—	$= 1$
反应常数, 转化率	ξ	mol	$\Delta\xi = \Delta n/v$
周转率	ξ	$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$	$\xi = d\xi/dt$
电动电位 (Zeta)	ξ	V	$= \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$

[illegible][illegible]

目 录

第 I 部分 理论基础

第 1 章 燃料电池的原理 / 3

- 1.1 氢 - 氧元素 / 4
- 1.2 燃料电池的类型 / 8
- 1.3 电池元件 / 10
- 1.4 使用液体燃料发电 / 13
- 1.5 煤炭发电 / 16
- 1.6 生物燃料电池 / 17
- 1.7 溶液中的氧化还原过程 / 19
- 1.8 静态燃料电池系统 / 20
- 1.9 移动应用 / 22
- 1.10 用电合成发电 / 24

参考文献 / 25

第 2 章 燃料电池的热力学和动力学 / 28

- 2.1 安静地燃烧 / 28
- 2.2 能量转换器 / 30
- 2.3 电池电压和电极电位 / 32
- 2.4 熵和放热 / 38
- 2.5 效率 / 41
- 2.6 电池电压 / 43
- 2.7 功率 / 44
- 2.8 过电压 / 45
- 2.9 电流 - 电压特征曲线 / 47
- 2.10 阻抗谱 / 49
- 2.11 等效电路 / 53
- 2.12 电极表面 / 54
- 2.13 电极过程的动力性 / 58
- 2.14 氢电极 / 64
- 2.15 氢氧化 / 66
- 2.16 氧电极 / 68

- 2.17 氧还原 / 69
- 2.18 循环伏安法 / 71
- 2.19 电催化剂 / 74
- 2.20 气体扩散电极 / 77
- 参考文献 / 85

第Ⅱ部分 技术与应用

第3章 碱性燃料电池 / 91

- 3.1 AFC 系统的特性参数 / 93
- 3.2 碱性燃料电池热力学 / 94
- 3.3 碱性电解质 / 96
- 3.4 电极材料 / 102
- 3.5 碱性燃料电池的使用性能 / 108
- 3.6 电池的设计 / 111
- 3.7 适用于航空航天燃料电池 / 112
- 3.8 FAE 燃料电池 / 115
- 3.9 带流动电解质的 AFC / 117
- 3.10 碱性降膜电池 / 122
- 3.11 应用 / 122
- 3.12 氨燃料电池 / 125
- 3.13 肼燃料电池 / 126
- 参考文献 / 126

第4章 聚合物电解质燃料电池 / 130

- 4.1 PEM 燃料电池的特征值 / 132
- 4.2 聚合物电解质 / 133
- 4.3 电极材料 / 146
- 4.4 运行特性 / 164
- 4.5 应用 / 176
- 4.6 燃料电池船只和飞行体 / 181
- 4.7 驱动方案对比 / 185
- 4.8 燃料电池车辆 / 191

- 4.9 来自次级燃料的氢 / 205
- 4.10 静态 PEM 燃料电池 / 208
- 4.11 便携式 PEM 燃料电池 / 211
- 4.12 冷却系统 / 213
- 参考文献 / 243

第5章 直接甲醇燃料电池 / 251

- 5.1 DMFC 系统的特征值 / 252
- 5.2 直接电池的热力学 / 254
- 5.3 电极反应和电极材料 / 257
- 5.4 DMFC 的运行特性 / 264
- 5.5 应用 / 271
- 5.6 醚直接发电 / 273
- 参考文献 / 274

第6章 磷酸燃料电池 / 278

- 6.1 PAFC 系统的特征值 / 280
- 6.2 酸性电解质 / 281
- 6.3 电极材料 / 284
- 6.4 运行特性 / 289
- 6.5 固定设备 / 290
- 6.6 燃料电池的系统比较 / 301
- 6.7 固体-酸燃料电池 / 302
- 参考文献 / 302

第7章 熔融电解质燃料电池 / 305

- 7.1 MCFC 系统的特点 / 308
- 7.2 熔融电解质 / 309
- 7.3 电极材料 / 312
- 7.4 运行特性 / 316
- 7.5 应用 / 319
- 7.6 沼气发电 / 326
- 参考文献 / 326

第8章 固体氧化物燃料电池 / 330

- 8.1 SOFC 系统的特性 / 332
- 8.2 固体电解质 / 333