

CAILIAO KEXUE
XINGNENG
GUOCHENG
GONGYI



材料科学
性能,过程,工艺

[西德] B. 伊尔施内尔 著

化学工业出版社



材 料 科 学

性能，过程，工艺

〔西德〕B. 伊尔施内尔 著

吴维岌 吴荫顺 译

化 学 工 业 出 版 社

内 容 介 绍

本书简要介绍了材料科学的近代理论。是根据作者多年在纽伦堡-爱尔兰根大学材料科学研究所第一教研室执教所用讲义基础上写成,深入浅出地对物质循环过程,材料的显微组织、热力学平衡、结构与键合、界面过程、腐蚀与防护、电学性质、磁学性质、材料的生产与加工工艺过程和无损检验等方面的科学原理与最新进展进行了讨论。其中材料的扩散、相变、强度、形变、断裂等是作者本人多年的研究领域。

本书可供大专院校材料科学及有关专业师生参考、也可供有关科学工作者、工程技术人员阅读。

B. Ilchner

Werkstoffwissenschaften

Eigenschaften, Vorgänge, Technologien

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York 1982

材 料 科 学

性能, 过程, 工艺

吴维炎 吴荫顺 译

责任编辑: 李志清

封面设计: 季玉芳

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $10^{5/8}$ 字数289千字印数1—3,490

1987年3月北京第1版1987年3月北京第1次印刷

统一书号15063·3893定价2.60元

前 言

今天的大学生是明天的工程师，他们将肩负起解决重大而复杂的工程技术任务，也将会碰到越来越多的材料问题，后者往往又是他们的一种特殊的专门领域。早先，由于可供设计者选用的材料不多、传统的设计思想受到一定的束缚。如在材料的某些必要性能数据尚属未知或已有数据不可靠的情况下，设计者往往只好用加大工件截面尺寸的办法来加以补偿。这种对原材料和能量不合理的使用和支配的方式原本是无可非议的。但是，今天这种思想也正越来越被一些新的思想所取代。

极高的技术要求有时会表现为不切实际的技术奢望。由于我们所处的世界、资源问题正变得更为紧张，这种要求就更受到限制。为此需要出现全新的材料方案以满足对性能的最高要求，包括在高温和某些腐蚀性环境中运行的部件对材料提出的各种性能要求。随着工业产品渗透入人类的日常生活，也致使人们对工业产品的安全性和可靠性的关注日增，这反过来又导致对诸如材料的可靠性和材料缺陷等一些传统的概念提出更为严格的新标准。针对世界性的原材料和能源短缺状况，出现了要求节省工程材料的对策，即是从设计的角度出发尽可能地减小工件的截面积。换言之，从材料工程的角度出发就是要提高材料的强度。同时，不论是设计师还是材料工程师都应注意到，在所有各种技术改进设想的背后，都有一个越来越突出的成本问题，亦即每项未被证明确有必要的花销都应予以制止。

为满足日益增长的各种需求，材料工程已在一些方面取得了有意义的进展：发展了多种多样的金属材料和非金属材料；通过组合运用不同的材料使构件的制作达到最佳化；出现了设计、制造和材料发展等几个方面最紧密的合作；通过对生产过程的精心监控和使

用最精确的检验方法而消灭次品和成功地减少由于腐蚀所致的材料损失。所有这些正是一门新的，有活力的材料工程科学应具有的科学基础的标志。

这本教科书的目的在于帮助大学生了解和认识材料问题的现状，并将引导他们自己去找到解决问题的途径。作者自1965年以来，为材料科学，化学工程和电工技术等系科的初学者开设了材料科学讲座、本书便是在讲座所用讲义的基础上写成的。阅读本书并不需要什么特别的预备知识。就现有篇幅而言，本书并不是为那些完成了本专业工学士学位的人们准备的教材。

为使这门材料科学知识能作出可靠的预见，在详细了解个别具体材料及其性能之前，首先应对各种性能本身以及在生产和使用材料时所发生的过程有个总体的了解。但这并不意味着贬低材料和工艺方面的实际知识对日后事业上获得成就所起的作用。然而，为了介绍贯穿于经常变化着的材料系统和材料工艺的现代材料技术，为了培养学生最合理地综合运用各种非常规的解决问题途径的能力，看来自始至终联系科学基础知识进行讲述是最合适的。在实际应用方面以及国民经济的各个方面都有许多事实说明材料科学与技术之间的联系。

这些目标决定了本书将成为介乎物理和化学等基础教程与设计原理及其它技术入门课程之间的一本书：在本书中，一方面介绍了实际材料（如钢和玻璃等）和实际装置（如高炉或挤压机等）、另一方面还介绍了一些重要的概念（如二元系或原子的晶格结构等）。

本书是一部教科书，但其对象并不限于学生。因此，本书的文体系用科学出版物的通俗语言。书中的插图，黑框中的重点，摘要和总结等都将有助于教学。

如同今日的大多数科学技术书籍一样，本书也是作者长期利用业余时间写成的。为此我要深深感谢我的妻子和女儿们的理解和支持。

纽伦堡-爱尔兰根大学材料工程研究所的同事们给予的帮助，

特别值得提出的是，工学士依·马蒂先生帮助完成了大量的草图，工学士乌·恩格尔先生承担了本书最后阶段有关数据和图片的大量工作，对此作者深表感谢。作者还要特别感谢斯普林格出版社的同事们，在本书手稿交付较迟的情况下，他们仍十分宽容并作出了很大努力，才能使本书得以高水平地出版而奉献于读者。

B. 伊尔施内尔

1981年8月于爱尔兰根

目 录

1 概论	1
1.1 物质循环中的工程材料	1
1.1.1 原料的供应, 市场和价格	1
1.1.2 短缺代用, 过剩储存	4
1.1.3 投资, 逸散, 回收	5
1.2 材料和能源	7
1.3 材料和环境	8
1.4 材料和文明史	8
2 材料种类和材料性能 (材料领域概述提纲)	11
2.1 材料种类	11
2.2 材料的性能	14
3 显微组织及其特点	16
3.1 目的和定义	16
3.2 金相试样的制备	16
3.3 光学显微镜	18
3.4 电子显微镜	18
3.5 电子束显微分析仪器	21
3.6 定量图象分析	23
3.7 显微组织组成单元的分类与性状	25
3.8 关于显微组织分析的结束语	31
4 平衡	32
4.1 状态和相	32
4.2 状态的稳定性	32
4.3 转变动力学	34
4.4 热力学参量	35
4.4.1 热函	35

4.4.2	生成热	38
4.4.3	热力学势和熵	39
4.5	测量方法	41
4.5.1	量热计, 热分析, 差热分析(DTA)	41
4.5.2	蒸汽压测量	43
4.5.3	测温	44
4.6	状态图	47
4.6.1	引言	47
4.6.2	怎样看状态图	48
4.6.3	Fe-C状态图	52
4.6.4	三元系状态图	54
5	原子键和材料结构	57
5.1	气体	57
5.2	凝聚相的键合力	58
5.3	熔体和玻璃	61
5.4	晶体	64
5.4.1	空间晶格和晶胞	64
5.4.2	主要的晶格类型	68
5.4.3	晶格缺陷	71
5.4.4	热膨胀	72
5.4.5	晶格结构的实验研究	73
5.5	溶液和固溶体	75
5.6	高分子聚合物	77
5.6.1	分子结构	77
5.6.2	大分子材料的设计	79
5.6.3	热塑性塑料·热固性塑料·弹性体	84
6	扩散、原子换位	88
6.1	扩散过程	88
6.1.1	定义	88
6.1.2	扩散过程的数学描述	88
6.1.3	扩散方程的解	90
6.1.4	扩散系数的依从关系	92
6.1.5	热激活	93

6.1.6	扩散机制	94
6.1.7	其它的驱动力	96
6.2	离子导电	96
6.3	热导	97
7	状态变化和相变	99
7.1	状态转变的分类	99
7.2	成核(均质和非均质)	100
7.3	蒸发和凝聚	104
7.4	熔化和凝固	105
7.4.1	传热	105
7.4.2	合金元素的重新分布	105
7.4.3	偏析和区域提纯	106
7.4.4	凝固时的成核问题·缩孔	107
7.4.5	共晶凝固	109
7.4.6	玻璃态凝固	110
7.5	固态中的扩散相变	111
7.5.1	表面层的生长(平面情况)	111
7.5.2	过饱和固溶体的析出	113
7.5.3	共析分解	116
7.5.4	时间-温度-转变图(ZTU-图)	117
7.6	马氏体转变	118
8	界面过程	120
8.1	界面能和界面张力	120
8.2	吸附	121
8.3	结晶的形状	121
8.4	润湿, 毛细吸力	122
8.5	烧结, 陶瓷的烧成	123
8.6	晶粒长大	126
8.7	奥斯特瓦尔特 (Ostwald) 生长	127
9	腐蚀与防护	130
9.1	材料损伤的实例·定义	130
9.2	水溶液腐蚀	131
9.2.1	电解质	131

9.2.2	电极	132
9.2.3	原电池	134
9.2.4	局部电池	138
9.2.5	酸腐蚀, 氧腐蚀, 生锈	139
9.2.6	钝化	141
9.3	防护措施	142
9.3.1	避免潮汽凝聚	142
9.3.2	水处理和去气	142
9.3.3	耐蚀合金	143
9.3.4	涂层和覆膜	143
9.3.5	阴极保护	144
9.3.6	选材	145
9.4	腐蚀与力学因素的交互作用	148
9.5	高温空气和气体腐蚀	151
9.5.1	基本机制 (氧化膜的生成, 内部反应)	151
9.5.2	防止高温腐蚀的保护措施	155
9.6	固体电解质	157
10	强度—形变—断裂	160
10.1	定义和量度单位	160
10.2	弹性形变	162
10.3	滞弹性形变, 阻尼 (参阅10.11.3节)	165
10.4	塑性和脆性行为的典型情况	166
10.5	拉伸试验, 应力-应变曲线	167
10.6	硬度试验	172
10.7	断裂过程	174
10.7.1	韧(塑)性断裂	174
10.7.2	脆性断裂	175
10.7.3	初始裂纹, 断裂力学要点	176
10.7.4	缺口冲击韧性	180
10.8	晶体的塑性, 位错	182
10.9	高温强度和形变	185
10.9.1	回复和再结晶	185

10.9.2 蠕变, 持久强度, 应力弛豫	187
10.10 疲劳强度和疲劳	191
10.11 粘滞流动, 滞弹性行为	194
10.11.1 引言和事例	194
10.11.2 基本机制, 粘度的定义	195
10.11.3 滞弹性模型	198
10.12 提高强度的措施	202
10.12.1 提高弹性刚度	202
10.12.2 提高塑性形变阻力	203
10.12.3 提高断裂强度和塑性	210
10.12.4 复合强化措施	213
10.12.5 纤维强化 (复合材料)	214
11 电学性质	216
11.1 关于电工材料的引言	216
11.2 金属导体中的电流传导	217
11.2.1 定义和量度单位	217
11.2.2 一些重要金属和合金的数据	218
11.2.3 温度关系和合金化的影响	220
11.2.4 弹性和塑性形变的影响	222
11.3 超导	224
11.4 非导体, 绝缘材料	226
11.4.1 工业绝缘材料	226
11.4.2 电极化	227
11.5 半导体	228
11.5.1 定义, 符号, 材料种类	228
11.5.2 导电机制	230
11.5.3 掺杂, 能带模型	231
11.5.4 离子导体	236
12 磁性和磁性材料	238
12.1 磁场, 定义	238
12.2 抗磁性和顺磁性	240
12.3 铁磁性	243
12.3.1 铁磁性的物理本质	243

12.3.2	反铁磁性和亚铁磁性	247
12.3.3	磁致伸缩	248
12.3.4	磁化曲线, 磁滞回线	249
12.3.5	反复磁化损耗	252
12.4	磁性材料	256
12.4.1	一般分类	256
12.4.2	软磁材料	258
12.4.3	硬磁材料	260
13	生产和加工工艺过程	265
13.1	由原材料至工程材料	265
13.1.1	矿石的开采和还原	265
13.1.2	钢的生产, 金属提纯	272
13.1.3	陶瓷材料的生产	277
13.1.4	玻璃生产	278
13.2	由材料到部件(成型)	279
13.2.1	产品和工艺过程概况	279
13.2.2	铸锭和连续铸造	281
13.2.3	模铸	282
13.2.4	粉末冶金	284
13.2.5	金属加工技术	285
13.2.6	陶瓷成型	290
13.2.7	玻璃成型	290
13.2.8	塑料成型	292
13.2.9	切削加工, 电加工	294
13.3	材料的连接	297
13.3.1	钎焊	297
13.3.2	焊接	299
13.3.3	粘接	303
13.4	表面改性·涂层	304
13.4.1	概述	304
13.4.2	扩散法表面改性	305
13.4.3	施加保护涂层	306
14	无损检验	309

14.1	定义, 可靠性和安全性	309
14.2	液渗法	311
14.3	磁粉法	312
14.4	涡流法	313
14.5	X射线和 γ 射线透视	314
14.6	超声波检查	318
14.7	光学全息摄影术	320
14.8	声发射	323
附录: 钢和有色合金的命名		326

1 概 论

1.1 物质循环中的工程材料

大约自1970年开始，有关原料的问题就受到越来越多的关注。世界上原料和能源材料的储量有限，这将给人类社会带来什么样的后果？材料的生产、加工和应用会对自然环境和人类社会产生什么样的影响？为便于对这些关系进行讨论，我们从建立物料平衡表和跟踪物料流程着手。

1.1.1 原料的供应，市场和价格

为制造金属、建筑材料和合成材料所用的原料量约占世界原材料产量的20%弱，相对于能源材料（煤、石油、天然气、铀）来说，它是较少的。但是，由于这些材料对所有的工业部门都是很关键的，因而保证这些材料的原料供应在技术上、经济上和政治上已成为当今的一个重大的国际性问题。

表 1.1给出有关材料世界年产量的一个大致估计。钢铁产量远高于其它金属的产量、后者则排在合成材料，建筑材料和木材（未计入用作燃料的木材）之后。1980年钢铁产量有下降的趋势，而铝和合成材料则稍有增长，今日世界的经济状况将使这种趋势发生改变。基于下述原因，预计高度工业化国家对原料的需求量将有所下降。

各个部门都出现了节约原料和能源的热潮；

- 市场已达一定程度的饱和（如汽车）；
- 由于技术的进步，使所消耗的原料比过去少的情况下可获得同等的生产功效；
- 由于不断增加的回收（再循环），降低了每吨成品所消耗的原材料量。

表 1.1 1980年若干材料的世界年产量
(单位: 百万吨)

钢	715	铝	19
铜	7,15	锌	6
铅	4	水泥	700
合成材料	40	木材	1200

但是, 应当看到世界范围内的原料消费指数仍在上升。其原因在于, 目前, 发展中国家今天为生产工程材料的人均原料消费量虽仅及工业化国家的很小一部分, 但这些国家人口众多, 他们的原料消费指数即使少量地增长, 也将对世界原料市场的需求产生很大的影响。

世界上现有的原料储量能否满足预期的需求呢? 如果我们估算一下地壳(深至1000米)的组分, 从理论上说不会发生任何短缺。这层地壳中含27%硅, 8%铝、5%铁, 2%镁、0.4%钛等等, 而它的总重约 3×10^{10} 亿吨, 简直如一个取之不尽的宝库。

但是, 从上述估算所作的推论只是一种假象, 实际上除硅之外, 其它各种重要元素的富矿物态仅分布于为数极少的地点(矿床), 而它们在广大地区的分布则由于浓度很低, 无法进行有经济价值的开采。因此, 我们将只讨论一些有限的矿藏, 这种矿藏由于物料流动中的开采和供给消耗而不断减少, 如图 1.1中的深井 a 所代表的。如以1970年已探明的储量或矿床为基准, 并假定世界的消费速度一定, 则各类矿物的全部储量将在一段可预期的时间内全部耗尽——对铝约100年, 铜约36年。若消费速度并非恒定, 而是以指数形式增长, 如对铝每年增长6.4%, 则情况将变得更糟。过去的统计数字加上社会总产量的数字都支持这一见解。由此推论, 现探明的铝仅足以用到2001年, 而铜只能用到1991年。

实际情况并不像所想的那么紧张, 这是因为:

- 原料消费速度的增长率低于指数增长率 (见上文);

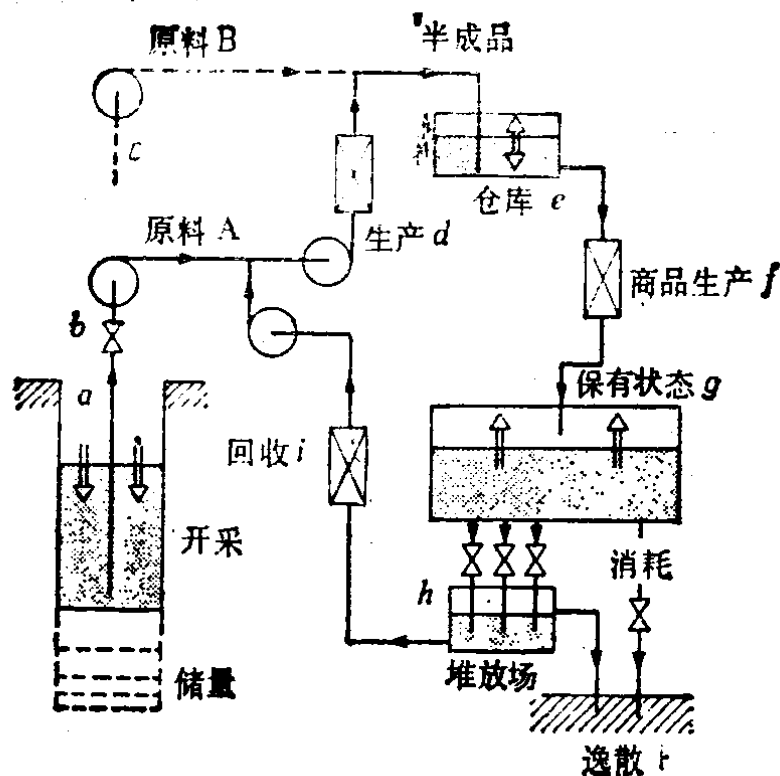


图 1.1 包括开采、加工、消费和回收过程的材料流程图

- 利用先进的地质勘探手段，在未曾全面勘察过的发展中国家，仍不断地发现新矿藏；
- 新技术的出现，使那些过去因品位低而未计入储量的贫矿变得具有开采价值；
- 由于总价格水平的上涨、使那些过去认为无利可图的矿床更多地列入具有利用价值的总储量之中。

这些因素均在图 1.1 的 a 中以虚线表示的竖井壁延长部位标出，这自然也意味着它们的开采费用更高。总之，今天我们可以说，在未来的 50~100 年内重要的原材料不会发生严重的短缺，但价格将明显上涨。

在表 1.2 中列举联邦德国的几种金属材料消耗量和它们的价格（及价格波动）。

总结：原料、价格、产量

导致原料储备紧张的原因：

- 工业化国家社会总产量的持续增长；

表 1.2 联邦德国1978年的金属材料消费量和它们每吨的价格

金 属	消费量，吨	价格，西德马克			
		77.12.31	78.12.31	79.12.31	80.12.31
铝锭	970000	2900	2900	3000	3450
重熔铝	373000				
铜	815000	2750	2950	3950	3830
锌	355000	1270	1320	1350	1610
铅	288000	1520	1750	2040	1510

- 在人口众多的发展中国家，开始出现人均消费量按指数增长。

缓和原料储备紧张的原因：

- 在工业化国家，尽管社会总产量增长，但由于市场饱和、技术进步和日益增多的材料回收利用而减少了原料消耗；
- 由于勘探、技术进步和价格上涨致使有开采价值的矿床不断增加。

一些重要材料的价格(1979)：

1吨粗钢价值约 400西德马克

1吨铝锭价值约 3000西德马克

1吨铜价值约 4000西德马克

一些重要材料的生产指数(取整数)；

钢：全世界 7 亿吨/年，联邦德国 4 千万吨/年

铝：全世界 1 千万吨/年，联邦德国 1 百万吨/年

铜：全世界 1 千万吨/年，联邦德国 40 万吨/年

1.1.2 短缺代用、过剩储存

在图 1.1中将原料A的储藏比作竖井，随着该井逐渐抽空，同时在深处又不断出现新的矿床。井深的增加意味着更高的开采费用和提取费用。这种费用决定于经济动力-在图1.1中为泵 b，即引人注目的成本-价格关系。

除实际成本增长的因素外，地区性或国际性的卡特尔还可能拧紧“价格螺旋”——表现为调节图 1.1中节流阀 b，这些使原料 A