

国家科普知识重点图书

高新技术科普丛书

智能材料

姚康德
成国祥
主编

化学工业出版社



国家科普知识重点图书

高新技术科普丛书

智能材料

姚康德 成国祥 主编

化学工业出版社

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

智能材料/姚康德, 成国祥主编. —北京: 化学工业出版社, 2002.1
(高新技术科普丛书)

ISBN 7-5025-3603-5

I. 智… II. ①姚…②. 成… III. 智能材料-普及读物 IV. TB381-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 087019 号

高新技术科普丛书

智能材料

姚康德 成国祥 主编

总策划: 陈逢阳 周伟斌

责任编辑: 王苏平

责任校对: 李 林

封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市云浩印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 7 字数 177 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3603-5/TQ·1479

定 价: 15.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《高新技术科普丛书》编委会

主任

路甬祥 中国科学院院长，中国科学院院士，
中国工程院院士

委员

汪家鼎 清华大学教授，中国科学院院士
闵恩泽 中国石油化工集团公司石油化工科学研究院教授，
中国科学院院士，中国工程院院士
袁 权 中国科学院大连化学物理研究所研究员，中国科学院院士
朱清时 中国科学技术大学教授，中国科学院院士
孙优贤 浙江大学教授，中国工程院院士
张立德 中国科学院固体物理研究所研究员
徐静安 上海化工研究院（教授级）高级工程师
冯孝庭 西南化工研究设计院（教授级）高级工程师

序

数万年来，人类一直在了解、开发、利用我们周围的自然界，同时不断地认识着自身，科学技术也从一开始就随着人类的生存需求而产生和发展着。人类发展史充分验证了邓小平“科学技术是第一生产力”的论断。科学技术的发展，促进了人类文明和社会的发展。

21 世纪是信息时代，21 世纪是生命科技的世纪，21 世纪是新材料和先进制造技术迅速发展和广泛应用的时代，21 世纪是高效、洁净和安全利用新能源的时代，21 世纪是人类向空间、海洋、地球内部不断拓展的世纪，21 世纪是自然科学发生重大变革、取得突破性进展的时代。科学技术的发展、新技术的不断涌现，必将引起新的产业革命，对我国这样的发展中国家来说，既是挑战，也是机遇，而能否抓住发展机遇，关键在于提高全民族的科学文化水平，造就一支具有科学精神、懂得科学方法、具有知识创新和技术创新能力的高素质劳动者队伍。所以，发展教育和普及科学知识、弘扬科学精神、提倡科学方法是我们应对世纪挑战的首要策略。为此，1999 年 8 月，江总书记在视察中国科学院大连化学物理研究所时进一步强调了科普工作的重要性：“在加强科技进步和创新的同时，我们应该大力加强全社会的科学普及工作，努力提高全民族的科学文化素质。这项工作做好了，就可以为科技进步和创新提供广泛的群众基础。”

为了普及和推广高新技术，化学工业出版社组织几位两院院士和专家编写了《高新技术科普丛书》。本套丛书的特点是：介绍当今科学产业中的一些高新技术原理、特点、重要地位、应用及产业化的现状与发展前景；突出“新”，介绍的新技术、新理论和新方法不仅经实践证明是成熟、可靠的，而且是有应用前景的实用技

术；力求深入浅出，图文并茂，知识性、科学性与通俗性、可读性及趣味性的统一，并充分体现科学思想和科学精神对开拓创新的重要作用。

《高新技术科普丛书》涉及与我国经济和社会可持续发展密切相关的高新技术，第一批9个分册包括绿色化学与化工、基因工程技术、纳米技术、高效环境友好的发电方式——燃料电池、最新分离技术（如超临界流体萃取、吸附分离技术、膜技术）、化学激光、生物农药等。本套丛书以后还将陆续组织出版多种高新技术分册。相信该套科普丛书对宣传普及科技知识、科学方法和科学精神，正确地理解、掌握科学，提高全民族的素质将会起到积极的作用。

洛角祥

2000年9月

前 言

智能原本是生物体才具有的特性，因此智能材料概念的提出缘于仿生构思。随着人类社会的科技水平的不断提高以及人类对生命认识的不断深化，从仿生角度出发，在丰厚的相关学科理论和技术基础之上，人们提出了智能材料（Intelligent Material）概念，亦称之为灵巧或机敏材料（Smart Material）。智能材料是新材料领域中正在形成的一门新的交叉学科，是被誉为 21 世纪新材料中非常重要的一种先进材料。材料智能化要求材料具有一些生物体才有的功能如传感、判断、处理、执行乃至自预警、自修复、刺激响应等，因此材料智能化是一项具有挑战性的任务，但目前仍处于发展的初级阶段。

本书共分 11 章。第 1 章智能材料概况，对智能材料作为 21 世纪新材料的背景和材料的智能化及其应用前景进行了概述。第 2 章智能材料的仿生构思与设计，从生物体的一些角度出发并借助一些实例对仿生构思予以说明。第 3 章智能金属材料及形状记忆材料，对材料自修复、形状记忆合金及形状记忆高分子材料进行了介绍。第 4 章智能无机非金属材料，讨论了自愈合陶瓷材料、压电材料、超磁致伸缩材料、灵巧窗户及其应用。第 5 章智能高分子材料，对高分子凝胶及体积相转变、响应不同刺激信号的高分子材料及潜在应用领域进行了着重讨论。第 6 章智能药物释放体系，对新型的药物释放系统和载体及其在药学领域的应用探索进行了评述。第 7 章智能聚合物微球，介绍了微球设计与智能化、微囊微球、刺激响应性乳液与粉体、电磁流变液、分子识别和分子印迹聚合物微球。第 8 章智能膜材，特别对控制通透膜材、传感膜材和膜材研究的一些新进展进行了讨论。第 9 章智能纤维，对纤维智能化、传感器、促动器、形状记忆纤维、调温、调湿、压电纤维等进行了介绍和展

望。第 10 章仿生组织工程相关材料, 针对材料等工程学科和生命学科交叉的新型组织工程学科的需求, 介绍了组织/细胞复合材料、组织工程相关生物材料、人工细胞外基质仿生化及生物降解材料的仿生表面工程等方面的最新动态。第 11 章智能材料与系统发展前景展望, 对智能生物医用材料、面向高技术探索和 21 世纪的智能材料与系统等进行了展望。本书各章之间内容相互独立又相互联系、交叉渗透, 读者可选择阅读。

本书第 1、2、10、11 章由天津大学姚康德编写, 第 3、7 章由天津大学成国祥编写, 第 4、5 章由天津大学刘文广编写, 第 6 章由天津大学尹玉姬编写, 第 8 章由天津工业大学陈莉编写, 第 9 章由天津工业大学张兴祥和香港理工大学陶肖明编写。

本书编写得到了化学工业出版社的帮助, 在此表示衷心感谢。由于时间仓促, 加之学科领域跨度大, 而且编写科普图书经验欠缺, 书中难免有不尽读者之意的地方, 请读者多多批评指正。

编者

2001 年 10 月

内 容 提 要

智能材料是一种能感知外部刺激，能够判断并适当处理且本身可执行的新型功能材料。智能材料与智能结构有着巨大的潜在的应用前景，其发展将推动和带动许多方面的技术进步。本书介绍了智能材料的仿生构思，并重点介绍了智能金属材料、智能无机非金属材料、智能高分子材料、智能药物释放体系、智能聚合物微球、智能膜材、智能纤维、仿生工程材料等的构成原理，应用领域及其发展前景。

本书是科普读物，主要供管理人员、科技人员和在校大学生、研究生及教师阅读。

目 录

第 1 章 智能材料概况	1
1.1 引言	1
1.2 功能材料的智能化	2
1.3 结构材料智能化	4
1.4 生物材料智能化	5
1.4.1 微球功能的智能化	5
1.4.2 智能生物材料与组织工程	5
基本参考文献	7
第 2 章 智能材料仿生构思	8
2.1 引言	8
2.2 生物信息	8
2.2.1 诊断用生物传感器和杂化材料	9
2.2.2 DNA 基纳米材料	9
2.2.3 由 DNA 构筑新材料	10
2.3 传感元件	10
2.4 执行元件	11
2.4.1 胶原	11
2.4.2 弹性蛋白	11
2.4.3 蚯蚓皮肤几何结构	12
2.4.4 实验室中生长的角膜	12
2.4.5 光驱动元件	12
2.4.6 快速响应纳米碳管传感器	13
2.4.7 特异蛋白质	13
2.4.8 高速定位	13
2.4.9 化学组装电子纳米计算机	14
2.4.10 STM 探针端部制备分子纳米电子装置	15
2.4.11 灵巧催化剂和底物	15

2.4.12 分子构象记忆元件	16
2.4.13 高分子复合材料的自愈合	17
基本参考文献	17
第3章 智能金属材料及形状记忆材料	19
3.1 引言	19
3.2 自预警和自修复	20
3.2.1 材料损伤机制与自预警和自修复功能	20
3.2.2 自修复功能	20
3.3 形状记忆合金	22
3.4 形状记忆高分子材料	24
3.4.1 形状记忆的原理	25
3.4.2 形状记忆高分子材料的特点	26
3.4.3 SMP 的制备方法及其特性	26
3.4.4 发展前景	32
基本参考文献	33
第4章 智能无机非金属材料	34
4.1 自诊断效应及自愈合陶瓷材料	34
4.1.1 高温下陶瓷涂层的自动成膜机制	35
4.1.2 高温陶瓷的高温氧化自适应性	35
4.1.3 氧化锆自增韧陶瓷	36
4.1.4 自愈合混凝土	37
4.2 压电材料及其应用	38
4.2.1 智能蒙皮	39
4.2.2 仿生陶瓷	40
4.3 灵巧窗户	41
基本参考文献	43
第5章 智能高分子材料	44
5.1 概述	44
5.2 高分子凝胶及体积相转变	45
5.3 响应不同刺激信号的高分子材料	47
5.3.1 温敏性凝胶	47
5.3.2 光敏性凝胶	47
5.3.3 磁场响应凝胶	48

5.3.4	电场响应凝胶	48
5.3.5	pH 响应凝胶	49
5.3.6	化学物质响应凝胶	50
5.3.7	温度/pH 响应性凝胶	53
5.4	智能高分子材料的潜在应用领域	53
5.4.1	细胞培养基质	53
5.4.2	人工肌肉	53
5.4.3	环境工程应用	54
5.4.4	酶的活性控制	55
5.4.5	药物释放载体	56
5.4.6	生物高分子凝胶在组织工程中的应用	59
5.4.7	可视化光学传感材料	62
5.4.8	表面图案技术	64
5.4.9	吸附分离致癌物质	64
	基本参考文献	65
第 6 章	智能药物释放体系	66
6.1	引言	66
6.1.1	药物释放体系的载体材料	67
6.1.2	控制释放机理	70
6.1.3	药物控制释放体系在临床中的应用	71
6.2	智能药物释放体系	72
6.2.1	概念的提出及含义	72
6.2.2	化学刺激响应体系	72
6.2.3	物理刺激响应体系	74
6.3	生物信号响应体系	78
6.3.1	靶向药物释放体系	78
6.3.2	结合药物释放体系	80
6.4	纳米药物释放体系	80
6.4.1	NPs 的制备方法	81
6.4.2	药物的包覆	81
6.4.3	药物释放	82
6.4.4	NPs 的表面特性	83
6.4.5	用 NPs 释放蛋白质和多肽	89

6.5 未来的药物释放体系	90
6.5.1 研究和开发新的高性能载体材料	90
6.5.2 加强剂型设计和制备技术的研究	91
6.5.3 智能化药物释放体系的研究	91
基本参考文献	92
第7章 智能聚合物微球	94
7.1 引言	94
7.2 微球设计与智能化	94
7.3 微囊微球智能化	97
7.3.1 微囊化与微囊微球	97
7.3.2 复合凝聚法	99
7.3.3 聚合物相分离法	100
7.3.4 液中硬化微囊化	100
7.3.5 流化床涂覆与脱溶剂化	101
7.3.6 微囊化化学方法	102
7.3.7 其他微囊化制备方法	103
7.3.8 微囊微球的智能化	104
7.4 刺激响应性乳液与粉体	108
7.5 电磁流变液	111
7.5.1 电流变液	111
7.5.2 磁流变液	113
7.5.3 电流变液与磁流变液的比较	114
7.6 生物医用功能高分子微球	115
7.6.1 生物功能高分子微球	115
7.6.2 医用功能高分子微球	118
7.7 分子识别和分子印迹聚合物微球	122
7.7.1 分子印迹和识别原理	122
7.7.2 分子印迹聚合物与模板分子的结合作用	123
7.7.3 分子印迹聚合物微球的制备及其应用	124
基本参考文献	128
第8章 智能膜材	129
8.1 引言	129
8.2 控制通透膜材	130

8.2.1 有机高分子膜	130
8.2.2 无机膜材	135
8.3 传感膜材	136
8.3.1 化学传感器	137
8.3.2 生物传感器	138
8.4 发展中的膜材	140
8.4.1 LB 膜	140
8.4.2 分子自组装膜	143
8.4.3 具有可调纳米孔道的高分子薄膜	144
基本参考文献	145
第 9 章 智能纤维	146
9.1 引言	146
9.1.1 智能纤维	146
9.1.2 智能纤维的地位	146
9.2 纤维传感器	147
9.2.1 光学纤维传感器	147
9.2.2 导电纤维传感器	150
9.3 纤维执行器	153
9.3.1 电驱动纤维执行器	154
9.3.2 湿驱动执行器	155
9.3.3 化学驱动纤维执行器	155
9.4 形状记忆纤维和防水透湿织物	157
9.4.1 形状记忆纤维	157
9.4.2 防水透湿织物	159
9.5 变色纤维	164
9.5.1 光敏变色纤维	164
9.5.2 热敏变色纤维	165
9.6 调温纤维	166
9.6.1 蓄热调温纤维	166
9.6.2 调温、调湿纤维	167
9.6.3 自动控温加热线	168
9.7 压电纤维	170
9.8 智能抗菌纤维	172

9.9 智能纤维的未来	173
基本参考文献	173
第10章 仿生组织工程材料	176
10.1 组织工程	176
10.2 组织与细胞	178
10.3 人工细胞外基质仿生化	179
10.3.1 设计和合成新材料	179
10.3.2 生物材料的改性	180
10.4 生物降解材料的表面工程	182
10.5 组织工程与生物力学	185
基本参考文献	188
第11章 智能材料与系统发展前景展望	189
11.1 智能生物医用材料	189
11.1.1 蛋白质分子识别能力控制和操作	189
11.1.2 杂化水凝胶组装蛋白质药物释放的载体	189
11.1.3 靶向释放新途径	190
11.1.4 控制释放芯片	190
11.2 智能系统	191
11.2.1 超快颜色显示	191
11.2.2 激光诱发凝胶体积变化	192
11.2.3 自律流动控制的水凝胶	195
11.2.4 快速电驱动执行元件	196
11.3 仿生机器人	197
11.4 高技术探索	199
11.4.1 灵巧化学传感器	199
11.4.2 生理介质中的微执行元件	199
11.4.3 围绕离子打结的低聚物	200
11.5 21世纪的智能材料与系统	201
11.5.1 人工角膜	201
11.5.2 仿生骨修复	202
基本参考文献	204

第 1 章 智能材料概况

1.1 引言

所谓智能 (intelligent) 或灵巧 (smart) 材料为能感知外部刺激 (传感功能)、能判断并适当处理 (处理功能) 且本身可执行 (执行功能) 的材料。

智能材料概念是由日本高木俊宜教授 1989 年 11 月在日本科学技术厅航空、电子等技术评审会上提出的, 同期美国在航空、宇宙领域中对传感功能和执行功能的适应性结构物、灵巧结构物的研究也很活跃, 因此人们逐渐将它们均统称为智能材料与智能系统。图 1-1 中示意出智能材料和灵巧结构物的特征, 可见 (b) 灵巧结构物为 (a) 智能材料的一种系统。其传感功能和执行功能置于复合材料中, 它又为具有处理功能和记忆功能的外部信息装置驱动, 而智能材料 (a) 本身具有所有这些功能。

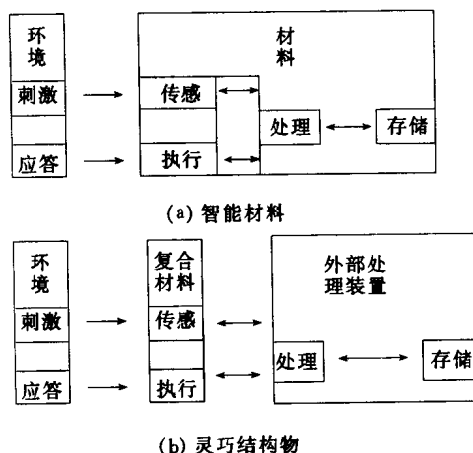


图 1-1 智能材料 (a) 和灵巧结构物 (b) 的特征

智能材料包括压电材料、电致伸缩、磁致伸缩、形态记忆合金和智能凝胶等材料。前面四种均具有在外场下可以移动的由结晶边界界定的畴结构，它们响应刺激产生的形状变化使其可作为执行元件。高分子凝胶则为大分子构成的三维网络，其结构中含有能对外界环境（温度、电场及化学物质）响应的部分，利用其大分子链或链段的构象与结构或基团的重排可使凝胶体积发生突变转变，由此可调控其刺激响应性。

1.2 功能材料的智能化

美国麻省理工学院的田中丰一教授 1975 年提出了“灵巧凝胶”（智能凝胶），至今已过去 20 余年。现在能响应刺激溶胀的聚合物网络已开发成一项软、湿有机技术。各先进国家的官、产、学对此高度刺激响应材料的研究与开发甚为关注，他们试图将生物体组织所具有的智能型刺激响应功能引入工业材料。目前智能高分子材料的发展日新月异，有人预计 21 世纪可望向模糊（fuzzy）高分子材料发展。所谓模糊材料，其特征刺激响应性不限于一一对应，材料的本身能判断并依次发挥其调节功能，像动物大脑那样能记忆和判断。研究模糊高分子材料的最终目标是发展有机分子计算机。

为将生物体组装所具有的刺激响应功能引入到工业材料并开发成智能材料，发达国家正加大投入，组织共同研究实体，开展国际合作。例如日本的研究与开发集中于运动功能材料、分离功能材料和释放功能材料。以运动功能材料为例，早在 20 世纪 50 年代，Katchalsky 等就在不同浓度的盐水溶液中浸渍胶原纤维，借助胶原的结晶-熔融产生的伸缩，制备了机械化学发动机模型机，即利用凝胶将化学能直接转变成机械能，犹如肌肉那样做功，被称为“机械化学系统”或“化学机械系统”，此类高分子驱动元件可望在人工肌肉、微机械（分子机械）等独特领域应用。

一些共轭链导电高分子经氧化过程可使其导电率增大数个数量级，同时产生伸缩变形。如电解聚合的聚苯胺酸性水溶液处于约