

国家“九五”重点图书

二十一世纪新材料丛书

宋健 二〇〇〇抄

主编 杨大智

智能材料与 智能系统

Intelligent Materials
and System

21 世纪

天津大学出版社

国家“九五”重点图书
21世纪新材料丛书

智能材料与智能系统

主编 杨大智

天津大学出版社

内 容 提 要

本书是我社出版的《21 世纪新材料丛书》之一, 由国内知名专家共同撰写而成。全书共 10 章, 分别讲述智能材料概述, 智能材料的仿生构思, 智能材料中的光纤传感系统, 形状记忆合金及其在智能结构中的应用, 无机非金属材料智能化, 智能材料中的压电、铁电材料, 电(磁)流变液与智能控制, 超磁致伸缩材料及其智能化应用, 智能高分子材料和智能结构等。书中内容反映了当前本学科国内外最新成果。

本书可供科技人员阅读, 亦可作研究生、大学生教材。

图书在版编目(CIP)数据

智能材料与智能系统/杨大智主编. —天津: 天津大学出版社, 2000.12

(21 世纪新材料丛书/石力开主编)

ISBN 7-5618-1392-9

I. 智... II. 杨... III. 智能材料-概论 IV. TB381

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 04673 号

出 版 天津大学出版社

出版人 杨风和

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内 (邮编: 300072)

电 话 发行部: 022—27403647 邮购部: 022—27402742

印 刷 河北新华印刷一厂

发 行 新华书店天津发行所

开 本 880mm×1230mm 1/32

印 张 13.75 插页 1

字 数 448 千

版 次 2000 年 12 月第 1 版

印 次 2000 年 12 月第 1 次

印 数 1~3 000

定 价 27.50 元

TP313.66

新材料是高技术
产业的先导

宋健



二〇〇〇年杪

21 世纪新材料丛书顾问委员会

主 任 师昌绪
委 员 (以姓氏笔画为序)
师昌绪 严东生 李恒德 肖纪美
林兰英 柯 俊 徐 僊 颜鸣皋

21 世纪新材料丛书编辑委员会

主 任 石力开
副 主 任 干福熹 吴人洁 左铁镛
委 员 (以姓氏笔画为序)
干福熹 王天民 王震西 王占国
王 焱 左铁镛 石力开 叶恒强
刘治国 杨大智 吴 锋 吴人洁
陈难先 陈皓明 欧阳世翕
郑敏政 金亿鑫 俞耀庭 姚康德
袁新泉 顾觉生 益小苏 黄伯云
雷永泉 熊家炯

丛书策划 胡文华

21 世纪新材料丛书
《智能材料与智能系统》分册编委会

主 编	杨大智		
编 委	田 蔚	关铁梁	陈骅骥
	李建保	赵晓鹏	姚康德

序 言

材料是人类一切生产和生活水平提高的物质基础，是人类进步的里程碑。材料对于国民经济建设和国防建设起着重要的作用。新材料是高新技术的基础和先导；本身也能形成很大的高技术产业。所以信息、生物技术和新材料已成为21世纪最重要、最有发展潜力的领域。我国历来对新材料的研究与开发都十分重视，在“十五”规划中新材料是高新技术研究和产业化的重点之一。

1986年我国开始实施国家高新技术研究发展计划（“863”计划），新材料是七个优先发展的领域之一。通过“863”计划的实施，使我国的新材料研究水平有了很大提高，支持了国防和相应的高新技术领域的发展和进步，在新材料的产业化方面也起到了促进和推动作用。通过计划的实施，组织并形成了我国新材料研究与开发的骨干力量，培养出了一大批高水平的年轻科学家和管理专家，形成了一系列有自己特点的研究基地和研究群体。这些成果为保持我国新材料的持续发展打下了坚实的基础。

根据我国高技术新材料领域所取得的成就和国际发展现状，国家高技术新材料领域专家委员会组织编写了一套《21世纪新材料丛书》。丛书对当今新材料领域的几个发展前沿进行了介绍，并展示了材料科学技术发展中的新概念、新理论、新技术、新成果和新产品。这对于规划我国新材料今后

的发展，推动技术创新都有一定的指导和参考价值，也为从事新材料研究开发的人员提供了一本很好的参考书，是一件很有意义的工作。

朱永宁

前 言

1986 年我国开始组织实施国家高技术研究发展计划（“863”计划），新材料是七个优先发展的领域之一。“863”计划的实施，为我国新材料的研究和发展起到了导向和推动作用，使我国的新材料研究水平有了很大的提高，支持了国防和相应的高新技术领域的发展和进步，促进了产业化进程，培养了一大批高水平的年轻科学家，形成了一系列有自己特点的研究基地和研究群体。这些成果为保持我国新材料的持续发展打下了坚实的基础。

国家高技术(863)新材料领域专家委员会在组织实施过程中，积极组织各种学术交流活动，编辑出版了多种会议论文集，并支持出版了大量有关新材料方面的专著和工具书。专家委员会于 1992 年组织编写出版了《高技术新材料要览》一书，还积极支持和参与了《材料科学技术大百科全书》《材料大词典》《材料商品手册》等书的编写出版工作。这些书籍的出版，为我国材料科学技术界准备了比较完整配套的参考书籍，对于提高我国的新材料研究发展水平和产业化进程必将产生深远的影响。

为了迎接 21 世纪新材料的蓬勃发展，新材料领域专家委员会又组织撰写了《21 世纪新材料丛书》（国家“九五”重点图书）。这套丛书包括了新材料当今几个主要的研究热点，如信息材料、复合材料、新能源材料、生物医用材料、智能材料与智能系统、生态环境材料和材料设计，以期能引起大家对新材料的关注。应该说明，这套丛书受篇幅的限制并没有能包括新材料的全部内容。金属材料、精密陶瓷材料、高分子材料没有单独列册，但仍然是目前工业应用材料的主体。随着研究工作的深入和先进制备技术的应用，新材料在不断出现，传统材料的性能也不断地得到改进和提高。纳米科学技术的发展为新材料的发展开拓了一条全新的途径。这些方面的工作留待今后进

行补充。

这套丛书反映了当今材料领域国际前沿的研究水平，体现了前瞻性，展示了21世纪新材料领域的新概念、新理论、新技术和正在开拓中的新研究领域，同时也展示了已经形成的或正在进入产业化的新成果、新产品。这套丛书不仅综合了国外的最新文献资料，而且注意反映了国内的工作成果，特别是“863”计划有关课题的研究开发成果。丛书没有刻意追求学科的完整性和系统性，采取了专题论述的形式，但每本书仍能给出该学科的概貌，具有很大的参考价值。丛书虽然定为专著，但力求做到简明扼要、深入浅出，使具有大专水平的读者(包括管理人员)能阅读，又对相关专业的研究人员有所启发。

丛书各分册的主要内容如下。

《信息材料》分册主要包括：微电子及集成半导体材料、光电子材料、光电子有机材料、信息功能陶瓷材料、信息传感材料、光电子显示材料、光纤通信材料、磁性和磁光存贮材料、高密度光存贮材料、铁电压电材料、非线性光学材料和固体激光材料等。

《复合材料》分册的重点是展示新型复合材料，如仿生复合材料、纳米复合材料、功能复合材料等，还阐述了复合材料新的设计、制备方法和复合技术，如原位复合、自蔓延技术、梯度复合等，并探讨了复合材料的回收再生与资源、环境的协调问题。

《新能源材料》分册主要介绍了当今国际上的研究开发热点，如新型二次电池材料、燃料电池材料、太阳能电池材料和核能材料。

《生物医用材料》分册介绍了组织工程和人工器官材料，包括硬组织修复与重建材料、软组织修复与重建材料，此外还介绍了生物智能材料、可降解与吸收材料、控制释放材料等。

《智能材料与智能系统》分册在综述材料智能化、智能材料与系统发展及应用前景的基础上，阐述了智能材料的仿生构思、智能材料中的光纤传感系统、形状记忆合金、压电/铁电材料、无机非金属材料、电磁流变液、超磁致伸缩材料与智能高分子材料及智能结构等的应用。

《生态环境材料》分册阐述了生态环境材料与可持续发展的关系

及协调性评价等问题，介绍了金属类生态环境材料、无机非金属类和高分子类生态环境材料以及生物环境材料等。

《材料设计》分册综述了材料设计的发展概况、材料设计的主要途径、主要计算方法以及国外的研究动态与展望等。本书也充分反映了我国科学家近年来在材料设计方面的研究成果和取得的进展。

参加撰写这套丛书的有全国百余位在材料领域有造诣的专家和教授，其中包括十多位院士。他们长期工作在材料科研和教学的第一线，知识渊博，经验丰富，与国际科学界有着广泛的联系。这样的作者群体保证了这套丛书的质量和水平。

丛书顾问委员会对本书的出版给与了全面的指导和关怀，从丛书的定位和特色、各分册的选题和主编的聘任，一直到每个分册的主要内容等都进行了具体的指导。这也是这套丛书能顺利编辑出版的一个重要的保证。

这套丛书已列入国家“九五”重点图书出版规划。天津大学出版社负责丛书的编辑和出版工作，为此做了大量认真细致的工作。他们和编委会及作者密切配合，严格把关，工作精益求精，为保证这套丛书在文字、版面及印刷等方面的高质量而作出了很大努力。

国家高技术(863)新材料领域专家委员会

首席科学家

石力开

主 编 简 介



杨大智 生于 1938 年。大连理工大学教授，博士生导师。1962 年毕业于清华大学，先后在美国伊利诺斯大学和佛罗里达国际大学做访问学者和访问教授。现任大连市形状记忆合金研究所所长，兼任中国材料研究学会理事、中国金属学会材料科学学会理事、中国仪器仪表学会仪表材料学会副理事长、大连市材料学会理事长等。主要从事马氏体相变，形状记忆合金，智能材料和生物医用材料等新材料、新工艺的研究。在国内外期刊和会议上发表 260 多篇论文。合著及主编 5 部专著。获得国家专利 5 项。

主要作者简介 (按章序排名)

姚康德(男,1937—) 天津大学教授,博士生导师。1960年天津大学研究生毕业,1979~1981年赴美国麻省州立大学做访问学者。现任天津大学高分子材料研究所所长,中国生物材料委员会委员等职。多年来从事生物材料高性能化、高分子凝胶仿生与智能化基础研究工作。曾获国家教委科技进步三等奖、天津市科技进步三等奖等,发表学术论文100多篇及《智能材料》专著等。

关铁梁(男,1942—) 教授级高级工程师。1966年毕业于中国科学技术大学物理系。现任信息产业部电子第四十六研究所副总工程师,所科学技术委员会主任。多年来从事激光物理及应用、磁光材料及全息存储、光纤传输、光纤无源器件及光纤传感技术研究。在国内外学术刊物及国际学术会议上发表论文60余篇。

李建保(男,1959—) 清华大学教授,博士生导师。1985年获日本国立山口大学理学硕士,1988年获日本东京大学工学博士。现任清华大学学术委员会秘书长、新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室主任,兼任中国硅酸盐学会青年委员会主任、中国材料研究学会常务理事、中国青年科协副主席及新材料产业发展促进会主任。1997年被评为全国十大杰出青年。主要从事高韧性陶瓷材料、智能材料、高频电磁波吸收材料、多孔陶瓷及其环保材料、陶瓷晶须合成及其复合材料等方面的研究。在国内外学术刊物上发表论文50余篇,出版材料专业书籍和科普读物多部。

田蔚(男,1939—) 北京航空航天大学教授,博士生导师。1963年毕业于北京航空航天大学材料系,1989~1991年在美国弗吉尼亚州立大学和工学院进修和访问。在国内外学术刊物上发表论文数十篇,出版著作2部。

赵晓鹏(男,1957—) 西北工业大学教授,博士生导师。1979年兰州大学物理系毕业,1982年获硕士学位,1995年获博士学位。现任西北工业大学电流变技术研究所所长,兼任中国材料研究学会首届青年委员会理事、中国力学学会·中国化学学会流变专业委员会委员、美国科学促进会(AAAS)会员。长期从事固体缺陷、断裂物理、仿生复合材料和智能材料研究。发表科研论文110

篇，获授权中国专利 9 项，作为第一完成人获中国航空工业总公司科技进步奖 1 项、西安市科技进步奖 1 项及省部级奖多项。

陈骅骥(男,1935—) 1957 年毕业于大连工学院机械系。历任三束材料改性国家重点联合实验室副主任、大连市机械工程学会理化检测学会副理事长、辽宁省金属学会理化检测学术委员会副主任、《大连理工大学学报》编委等。长期从事金属材料专业的物理性能分析和功能材料等教学和科研工作。在国内外期刊和会议上发表论文 80 多篇，出版高校教材 2 部。获国家教委科技进步二等奖 1 项，国家专利 1 项。

目 录

第 1 章 智能材料概述	杨大智(1)
1.1 材料发展的新纪元——智能材料	(1)
1.2 智能材料的内涵与定义	(3)
1.2.1 智能材料的内涵	(3)
1.2.2 智能材料的定义	(7)
1.3 耗散结构与材料的内禀特性	(10)
1.3.1 耗散结构	(10)
1.3.2 材料的内禀特性	(12)
1.4 材料的智能化	(17)
1.4.1 材料的自适应性	(17)
1.4.2 材料和结构的智能属性评定	(19)
1.4.3 智能材料的复合准则	(22)
1.4.4 智能材料的几种基本组元	(24)
1.4.5 智能材料的设计、合成及类型	(26)
1.5 智能材料和结构的应用前景	(33)
1.5.1 用于航空、航天飞行器	(34)
1.5.2 用于建筑和工程结构中	(35)
1.5.3 用于机器人中	(35)
1.5.4 用于日常生活中	(36)
1.6 智能材料与结构展望	(36)
参考文献	(37)
 第 2 章 智能材料的仿生构思	姚康德 杨大智(39)
2.1 智能材料的蓝本——细胞	(39)
2.1.1 视觉	(40)
2.1.2 听觉	(40)

2.1.3 味觉	(40)
2.1.4 嗅觉	(41)
2.1.5 触觉	(41)
2.2 生物材料的多级结构	(42)
2.3 生物的信息处理和反馈	(44)
2.4 材料仿生与智能材料	(47)
参考文献	(51)

第3章 智能材料中的光纤传感系统..... 关铁梁(52)

3.1 发展概述	(52)
3.2 智能材料中传感系统的选择	(54)
3.3 智能材料用特种光纤	(55)
3.3.1 细径光纤	(56)
3.3.2 特殊涂覆光纤	(59)
3.3.3 抗疲劳光纤	(61)
3.3.4 单模保偏光纤	(63)
3.3.5 双模光纤	(64)
3.3.6 同心双通道光纤	(67)
3.4 光纤传感系统	(68)
3.4.1 系统概述	(68)
3.4.2 马赫-泽德光纤传感器	(69)
3.4.3 迈克尔逊光纤传感器	(71)
3.4.4 法布里-珀罗光纤传感器	(73)
3.4.5 光纤布拉格光栅传感器	(76)
3.5 信号检测技术	(81)
3.5.1 无源零差检测技术	(81)
3.5.2 零差相位开关技术	(82)
3.5.3 准外差检测	(82)
3.5.4 光谱编码和解码技术	(83)
3.5.5 波长解调技术	(84)
3.6 应用进展	(87)

3.6.1 应变和温度的同时测量	(87)
3.6.2 复合材料固化监测	(92)
3.6.3 损伤评估	(95)
3.6.4 水泥结构件中的应用	(97)
3.7 展望	(99)
参考文献	(101)

第4章 形状记忆合金及其在智能结构中的应用..... 杨大智(104)

4.1 形状记忆合金的概念	(104)
4.1.1 形状记忆效应的微观机理	(105)
4.1.2 形状记忆合金伪弹性	(110)
4.2 形状记忆合金的特性及本构关系模型	(111)
4.2.1 形状记忆合金的热滞回线	(111)
4.2.2 形状记忆合金相变的本构关系	(111)
4.2.3 包含塑性方法基本特点的本构关系简介	(117)
4.3 NiTi 形状记忆合金的驱动特性研究	(117)
4.3.1 预应变 NiTi 合金丝在加热、冷却过程的回复 力—温度曲线	(117)
4.3.2 NiTi 记忆合金储能、耗能、输出功与温度和 预应变关系	(118)
4.3.3 NiTi 合金热-机循环过程中的应力—应变— 温度关系	(120)
4.3.4 形状记忆合金的阻尼特性	(122)
4.4 形状记忆合金复合材料及其智能属性	(124)
4.4.1 NiTi 合金丝复合材料	(124)
4.4.2 NiTi 形状记忆合金颗粒复合材料	(128)
4.5 形状记忆合金的应用	(129)
4.5.1 NiTi 记忆合金复合材料提高冲击韧性	(129)
4.5.2 NiTi 记忆合金主动控制裂纹产生和扩展	(132)
4.5.3 NiTi 合金主动控制振动	(133)
4.5.4 形状记忆合金的良好“自适应”耐疲劳磨损	(135)