



教育部高等学校
材料科学与工程教学指导委员会规划教材

● 丛书主编 黄伯云

功能材料导论

主 编 李廷希 张文丽
主 审 肖立新

Introduction to
Functional Materials



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



教育部高等学校
材料科学与工程教学指导委员会规划教材

● 丛书主编 黄伯云

功能材料导论



主 编 李廷希 张文丽
主 审 肖立新

Introduction to Functional Materials



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

功能材料导论/李廷希,张文丽主编. —长沙:中南大学出版社,
2011.7

ISBN 978 - 7 - 5487 - 0252 - 8

I. 功... II. ①李...②张... III. 功能材料 IV. TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 076216 号

功能材料导论

李廷希 张文丽 主编

☐责任编辑 周兴武

☐责任印制 周 颖

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙市华中印刷厂

☐开 本 787×960 1/16 ☐印张 20.75 ☐字数 449 千字 ☐插页

☐版 次 2011 年 7 月第 1 版 ☐2011 年 7 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 0252 - 8

☐定 价 38.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内 容 简 介



本书为教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会规划教材,根据新时期高等学校材料科学与工程的教学要求编写。

本书简明扼要地阐述了功能材料的基本知识和研究方法。全书共分 10 章,内容包括:功能材料概论、电功能材料、敏感材料、超导材料、磁性功能材料、新型能源材料、智能材料与结构、化学功能材料、生物医学功能材料、光学功能材料等。

本书注重多学科渗透与交叉,实现个性与共性的结合,以材料类知识背景为主线,兼顾化学类、化工类专业学生的知识结构,对功能材料进行了较全面的知识介绍,同时依据材料科学中功能材料的独特地位,对国内国际功能材料领域的最新研究动态作了介绍。

本书为材料科学与工程类相关专业研究生、本科高年级学生的教材,也可供相关专业的科研人员和管理人员参考。

教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会规划教材

编 审 委 员 会

主 任

黄伯云(教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会主任委员、中国工程院院士、中南大学教授、博士生导师)

副主任

姜茂发(分指委*主任委员、东北大学教授、博士生导师)

吕 庆(分指委副主任委员、河北理工大学教授、博士生导师)

张新明(分指委副主任委员、中南大学教授、博士生导师)

陈延峰(材物与材化分指委**副主任委员、南京大学教授、博士生导师)

李越生(材物与材化分指委副主任委员、复旦大学教授、博士生导师)

汪明朴(教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会秘书长、中南大学教授、博士生导师)

委 员

(以姓氏笔画为序)

于旭光(分指委委员、石家庄铁道学院教授)

韦 春(桂林工学院教授、博士生导师)

王 敏(分指委委员、上海交通大学教授、博士生导师)

介万奇(分指委委员、西北工业大学教授、博士生导师)

水中和(武汉理工大学教授、博士生导师)

孙 军(分指委委员、西安交通大学教授、博士生导师)

刘 庆(重庆大学教授、博士生导师)

刘心宇(分指委委员、桂林电子科技大学教授、博士生导师)

刘 颖(分指委委员、北京理工大学教授、博士生导师)

朱 敏(分指委委员、华南理工大学教授、博士生导师)

注：* 分指委：全称教育部高等学校金属材料工程与冶金工程专业教学指导分委员会；

** 材物与材化分指委：全称教育部高等学校材料物理与材料化学专业教学指导分委员会。

曲选辉(北京科技大学教授、博士生导师)
任慧平(教育部高职高专材料类教学指导委员会主任委员、内蒙古科技大学教授)
关绍康(分指委委员、郑州大学教授、博士生导师)
阮建明(中南大学教授、博士生导师)
吴玉程(分指委委员、合肥工业大学教授、博士生导师)
吴 化(分指委委员、长春工业大学教授)
李 强(福州大学教授、博士生导师)
李子全(分指委委员、南京航空航天大学教授、博士生导师)
李惠琪(分指委委员、山东科技大学教授、博士生导师)
余志明(中南大学教授、博士生导师)
余志伟(分指委委员、东华理工学院教授)
张 平(分指委委员、装甲兵工程学院教授、博士生导师)
张 昭(分指委委员、四川大学教授、博士生导师)
张 涛(分指委委员、北京航空航天大学教授、博士生导师)
张文征(分指委委员、清华大学教授、博士生导师)
张建新(河北工业大学教授)
张建勋(西安交通大学教授、博士生导师)
沈峰满(分指委秘书长、东北大学教授、博士生导师)
杨贤金(分指委委员、天津大学教授、博士生导师)
陈文哲(分指委委员、福建工程学院教授、博士生导师)
陈翌庆(材物与材化分指委委员、合肥工业大学教授、博士生导师)
周小平(湖北工业大学教授)
赵昆渝(昆明理工大学教授、博士生导师)
赵新兵(分指委委员、浙江大学教授、博士生导师)
姜洪义(武汉理工大学教授、博士生导师)
柳瑞清(江西理工大学教授)
聂祚仁(北京工业大学教授、博士生导师)
郭兴蓬(材物与材化分指委委员、华中科技大学教授、博士生导师)
黄 晋(分指委委员、湖北工业大学教授)
阎殿然(分指委委员、河北工业大学教授、博士生导师)
蒋 青(分指委委员、吉林大学教授、博士生导师)
蒋建清(分指委委员、东南大学教授、博士生导师)
潘春旭(材物与材化分指委委员、武汉大学教授、博士生导师)
戴光泽(分指委委员、西南交通大学教授、博士生导师)

总 序



材料是国民经济、社会进步和国家安全的物质基础与先导,材料技术已成为现代工业、国防和高技术发展的共性基础技术,是当前最重要、发展最快的科学技术领域之一。发展材料技术将促进包括新材料产业在内的我国高新技术产业的形成和发展,同时又将带动传统产业和支柱产业的改造和产品的升级换代。“十五”期间,我国材料领域在光电子材料、特种功能材料和高性能结构材料等方面取得了较大的突破,在一些重点方向迈入了国际先进行列。依据国家“十一五”规划,材料领域将立足国家重大需求,自主创新、提高核心竞争力、增强材料领域持续创新能力将成为战略重心。纳米材料与器件、信息功能材料与器件、高新能源转换与储能材料、生物医用与仿生材料、环境友好材料、重大工程及装备用关键材料、基础材料高性能化与绿色制备技术、材料设计与先进制备技术将成为材料领域研究与发展的主导方向。不难看出,这些主导方向体现了材料学科一个重要发展趋势,即材料学科正在由单纯的材料科学与工程向与众多高新科学技术领域交叉融合的方向发展。材料领域科学技术的快速进步,对担负材料科学与工程高等教育和科学研究双重任务的高等学校提出了严峻的挑战,为迎接这一挑战,高等学校不但要担负起材料科学与工程前沿领域的科学研究、知识创新任务,而且要担负起培养能适应材料科学与工程领域高速发展需求的、具有新知识结构的创新型高素质人才的重任。

为适应材料领域高等教育的新形势,2006—2010 年教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会积极组织材料类高等学校教材的建设规划工作,成立了规划教材编审委员会,编审委员会由相关学科的分教学指导委员会主任委员、委员以及全国 30 余所有影响力和代表性的高校材料学院院长组成。编审委员会分别于 2006 年 10 月和 2007 年 5 月在湖南张家界和中南大学召开了教材建设研讨会和教材提纲审定会。经教学指导委员会和编审委员会推荐和遴选,逾百名来自全国几十所高校的具有丰富教学与科研经验的专家、学者参加了这套教材的编

写工作。历经几年的努力，这套教材终于与读者见面了，它凝结了全体编写者与组织者的心血，充分体现了广大编写者对教育部“质量工程”精神的深刻体会，对当代材料领域知识结构的牢固掌握和对高等教育规律的熟练掌握，是我国材料领域高等教育工作者集体智慧的结晶。

这套教材基本涵盖了金属材料工程专业的主要课程，同时还包含了材料物理专业和材料化学专业部分专业基础课程，以及金属、无机非金属和高分子三大类材料学科的实验课程。整体看来，这套教材具有如下特色：①根据教育部高等学校教学指导委员会相关课程的“教学大纲”及“基本要求”编写；②统一规划，结构严谨，整套教材具有完整性、系统性，基础课与专业课之间的内容有机衔接；③注重基础，强调实践，体现了科学性、实用性；④编委会及作者由材料领域的院士、知名教授及专家组成，确保了教材的高质量及权威性；⑤注重创新，反映了材料科学领域的新知识、新技术、新工艺、新方法；⑥深入浅出，说理透彻，便于老师教学及学生自学。

教材的生命力在于质量，而提高质量是永恒的主题。希望教材的编审委员会及出版社能做到与时俱进，根据高等教育改革和发展的形势及材料专业技术发展的趋势，不断对教材进行修订、改进、完善，精益求精，使之更好地适应高等教育人才培养的需要，也希望他们能够一如既往地依靠业内专家，与科研、教学、产业第一线人员紧密结合，加强合作，不断开拓，出版更多的精品教材，为高等教育提供优质的教学资源和服务。

衷心希望这套教材能在我国材料高等教育中充分发挥它的作用，也期待着在这套教材的哺育下，新一代材料学子能茁壮成长，脱颖而出。

董伯云

前 言



本书为教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会规划教材,根据教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会提出的本课程教学基本要求,针对材料科学与工程类专业及相关专业研究生、本科高年级学生的特点编写,也可供相关专业的科研人员和管理人员了解功能材料相关知识和理论时参考。

功能材料是指那些具有优良的电学、磁学、光学、热学、声学、力学、化学、生物学功能,特殊的物理、化学、生物学效应,能完成功能相互转化,主要用来制造各种功能元器件而被广泛应用于各类高科技领域的高新技术材料。功能材料是新材料领域的核心,是国民经济、社会发展及国防建设的基础和先导,它涉及信息技术、生物工程技术、能源技术、纳米技术、环保技术、空间技术、计算机技术、海洋工程技术等现代高新技术及其产业。功能材料不仅对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用,还对我国相关传统产业的改造和升级,实现跨越式发展起着重要的促进作用。本书内容涵盖了电性功能材料、敏感材料、超导材料、磁性功能材料、新型能源材料、智能材料与结构、化学功能材料、生物学功能材料、光学功能材料等内容。本书通过具体的案例,对功能材料的发展历史、制备方法、应用领域作了系统的阐述,介绍了最新的科技成果,反映了功能材料各个领域的最新发展动态。

在金属材料工程、无机非金属材料工程、高分子材料与工程和复合材料等材料科学与工程的大框架下,本教材针对材料物理和化学、材料学、材料加工工程等专业研究生的特点,注重多学科的渗透与交叉,实现个性与共性的结合,以材料类知识背景为主线,兼顾化学类、化工类等专业的研究生、本科高年级学生的知识结构,探索本教材的新型结构体系。依据材料科学中功能材料的独特地位和国内国际功能材料领域的最新研究动态,针对国内高校本科教学普遍开设功能材料、新材料等课程的情况,在不失本学科结构体系的前提下,增强了对学科研究的深度和广度的介绍,部分内容反映了学科前沿,为各个方向的研究生进入课题提供参考。在科学性、系统性和实用性的前提下,大量吸取国外及国内同类教材的精华,丰富

和完善本教材的内容体系。本书涉及的信息面广与知识点多,各高校可根据不同专业学生的具体情况,针对培养目标的差异有选择地使用。教学安排上建议40学时左右。

本书由李廷希教授和张文丽教授负责组织编写。共分10章,第1、8章由李廷希教授编写;第2、3章由汪静教授编写;第4、9章由桑晓明教授编写;第5章由方鹏飞教授编写;第7章由魏建红博士编写;第6、10章由张文丽教授编写。全书由肖立新教授主审。本书的出版得到了中南大学出版社的大力支持,作者在此一并致谢。同时对本书编写过程中所参考和引用文献资料的作者致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限,经验不足,书中难免有不妥不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2011年7月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 功能材料发展概说	(1)
1.2 功能材料的分类及特点	(2)
1.3 功能材料的制备方法简介	(3)
1.3.1 溶胶-凝胶法	(4)
1.3.2 快淬快凝技术	(4)
1.3.3 复合与杂化	(4)
1.3.4 无机非金属功能材料的典型制备方法	(5)
1.3.5 功能高分子材料的制备	(6)
1.4 功能材料的表征方法简介	(8)
1.4.1 材料组成表征	(8)
1.4.2 材料结构表征	(8)
1.4.3 材料性能表征	(9)
习 题	(9)
第2章 电性功能材料	(10)
2.1 电子导电材料	(10)
2.2 电阻材料和电热材料	(11)
2.2.1 电阻材料	(11)
2.2.2 电热材料	(12)
2.3 快离子导体材料	(13)
2.3.1 离子类载流子电导机理	(13)
2.3.2 影响离子导电的因素	(14)
2.3.3 快离子导体的传导特性和晶体结构	(14)
2.3.4 快离子导体材料(按照导电离子分类)	(15)
2.3.5 快离子导体材料的应用	(16)
2.4 导电薄膜	(18)
2.4.1 导电薄膜的基本要求	(18)

2.4.2	导电薄膜的种类	(18)
2.4.3	导电薄膜的制备	(20)
习 题		(21)
第3章 敏感材料		(22)
3.1	热敏陶瓷	(22)
3.1.1	热敏电阻的基本参数	(22)
3.1.2	PTC 热敏电阻	(23)
3.1.3	NTC 电阻材料	(23)
3.1.4	CTR 材料	(24)
3.1.5	高温热敏电阻材料	(24)
3.1.6	低温热敏电阻材料	(25)
3.2	气敏陶瓷	(26)
3.2.1	气敏陶瓷概论	(26)
3.2.2	等温吸附方程(Langmuir 公式)	(26)
3.2.3	气敏陶瓷的种类	(27)
3.2.4	SnO ₂ 系气敏元件	(28)
3.2.5	ZnO 系气敏元件	(29)
3.2.6	氧化铁系气敏元件	(29)
3.2.7	接触燃烧式可燃气体气敏陶瓷	(30)
3.2.8	氧敏传感器陶瓷	(31)
3.3	热释电陶瓷	(32)
3.3.1	热释电陶瓷的结构与性能	(32)
3.3.2	热释电陶瓷的主要应用	(32)
3.3.3	几种典型的热释电陶瓷	(33)
习 题		(34)
第4章 超导材料		(35)
4.1	超导材料的基本性质	(35)
4.1.1	超导电性和超导体	(35)
4.1.2	超导材料的基本物理性质	(36)
4.1.3	超导体的临界参数	(38)
4.1.4	超导机理	(39)
4.2	超导材料的发展(金属、陶瓷、有机)	(44)

4.2.1 元素超导材料	(44)
4.2.2 合金和化合物超导材料	(44)
4.2.3 有机高分子超导材料	(46)
4.3 超导材料的应用	(47)
4.3.1 低温超导材料的应用	(47)
4.3.2 高温超导材料的应用	(49)
习 题	(56)
第5章 磁性功能材料	(57)
5.1 磁学基础	(57)
5.1.1 原子的磁性	(57)
5.1.2 物质的磁性	(58)
5.1.3 磁性参数	(60)
5.2 磁性金属材料	(61)
5.2.1 软磁合金	(61)
5.2.2 铸造及可加工永磁合金	(66)
5.2.3 稀土永磁合金	(68)
5.3 铁氧体	(74)
5.3.1 铁氧体的晶体结构	(74)
5.3.2 软磁铁氧体	(76)
5.3.3 永磁铁氧体	(80)
5.3.4 其他类型铁氧体	(82)
5.3.5 铁氧体的制备	(83)
5.4 有机磁性材料	(85)
5.4.1 纯有机磁性化合物	(86)
5.4.2 金属有机磁性材料	(88)
5.4.3 黏接磁性材料	(89)
5.4.4 磁性高分子微球	(93)
5.4.5 有机磁性材料的应用	(95)
习 题	(96)
第6章 新型能源材料	(97)
6.1 太阳能电池材料	(97)
6.1.1 光伏效应和光伏太阳能电池	(97)

6.1.2	光伏太阳能电池材料的性能及分类	(99)
6.1.3	硅基太阳能电池材料	(101)
6.1.4	有机高分子材料太阳能薄膜电池	(103)
6.1.5	无机化合物薄膜太阳能电池	(103)
6.1.6	纳米晶薄膜材料太阳能电池	(104)
6.2	锂离子电池与电池材料	(109)
6.2.1	锂离子电池的工作原理	(110)
6.2.2	锂离子电池正极材料	(111)
6.2.3	锂离子电池负极材料	(119)
6.3	固体燃料电池材料	(120)
6.3.1	燃料电池的工作原理与结构	(120)
6.3.2	燃料电池的分类	(122)
6.3.3	固体氧化物燃料电池电解质	(124)
6.3.4	SOFC 固体电解质材料的制备方法	(131)
6.3.5	固体电解质的薄膜化技术	(132)
6.4	储氢材料	(132)
6.4.1	储氢材料的定义	(133)
6.4.2	储氢合金材料	(133)
6.4.3	炭质储氢材料	(138)
6.4.4	络合物储氢材料	(139)
6.4.5	玻璃微球储氢	(140)
6.4.6	储氢材料的应用	(140)
6.5	热电材料	(142)
6.5.1	温差电效应	(142)
6.5.2	热电材料的性能评价	(143)
6.5.3	典型的热电材料	(145)
6.5.4	梯度结构热电材料	(149)
习 题		(151)

第 7 章 智能材料与结构

7.1	智能材料及结构概念	(152)
7.1.1	智能材料与结构的定义	(152)
7.1.2	材料的智能化	(153)
7.1.3	智能材料与结构的研究现状与发展前景	(156)

7.2	智能材料的设计	(157)
7.2.1	智能材料的设计思路与原理	(157)
7.2.2	智能材料与仿生	(158)
7.2.3	智能材料与信息	(158)
7.3	记忆合金(金属)	(159)
7.3.1	形状记忆效应及其原理	(159)
7.3.2	钛镍系形状记忆合金	(163)
7.3.3	铜基形状记忆合金	(164)
7.3.4	铁基形状记忆合金	(165)
7.3.5	记忆合金的应用及发展前景	(166)
7.4	压电及电致伸缩材料	(166)
7.4.1	材料的压电和铁电特性	(166)
7.4.2	电致伸缩陶瓷	(170)
7.4.3	压电和铁电薄膜	(171)
7.4.4	压电复合材料	(173)
7.4.5	高性能铁电陶瓷的制备	(175)
7.5	电流变体	(176)
7.5.1	电流变效应及机理	(176)
7.5.2	电流变液组成和性能	(178)
7.5.3	影响电流变效应的因素	(181)
7.5.4	电流变液的工程应用及发展前景	(182)
习 题		(183)
第8章	化学功能材料	(184)
8.1	纳米材料	(184)
8.1.1	纳米材料简介	(184)
8.1.2	纳米材料的基本概念	(186)
8.1.3	纳米材料的基本性能	(187)
8.1.4	纳米材料的制备技术	(189)
8.1.5	纳米材料的应用	(193)
8.1.6	纳米材料的发展前景及展望	(197)
8.2	化学薄膜材料	(198)
8.2.1	膜材料的分类与特点	(198)
8.2.2	膜材料的制备方法简介	(199)

8.2.3	功能无机膜材料	(201)
8.2.4	有机高分子膜材料	(202)
8.2.5	特种纳滤膜、超滤膜和炭膜介绍	(203)
8.3	有机电子材料	(203)
8.3.1	有机电子材料的电性能	(203)
8.3.2	有机电子材料的光性能	(205)
8.3.3	有机电子材料的化学性能	(206)
8.3.4	紫外光刻胶的应用	(208)
8.4	功能色素材料	(209)
8.4.1	色素的构造和性质	(209)
8.4.2	色素的种类	(209)
8.4.3	有机电致发光功能色素材料	(210)
8.4.4	化学发光材料	(211)
8.4.5	印刷用功能色素	(213)
8.5	特种有机硅材料	(217)
8.5.1	有机硅简介	(217)
8.5.2	有机硅的特征	(218)
8.5.3	有机硅材料的分类	(218)
8.5.4	有机硅材料的应用	(219)
习 题		(221)
第9章	生物医学功能材料	(222)
9.1	生物医学材料的特征与评价	(222)
9.1.1	生物医学材料的研究内容、分类和基本性能要求	(222)
9.1.2	生物医学材料的生物相容性及生物学评价	(229)
9.1.3	生物医学材料的研究现状、研究方向和发展趋势	(232)
9.2	人工器官与生物医学材料	(234)
9.2.1	人工器官概述	(234)
9.2.2	人工器官的种类及基本原理	(235)
9.2.3	人工器官的现状与发展	(245)
9.3	药物载体	(247)
9.3.1	药用功能材料的分类和基本性能要求	(247)
9.3.2	药物控制释放和载体材料	(249)
9.3.3	高分子微胶囊药物释放体系	(254)

9.3.4 靶向药物释放体系	(259)
9.3.5 智能化药物释放体系	(261)
9.4 组织工程材料	(264)
9.4.1 组织工程原理	(265)
9.4.2 组织工程材料的研究现状与前景	(268)
习 题	(272)
第 10 章 光学功能材料	(273)
10.1 发光材料	(273)
10.1.1 光致发光的基本原理	(273)
10.1.2 发光材料的主要性能参数	(276)
10.1.3 影响材料发光性能的主要因素	(277)
10.1.4 典型发光材料	(280)
10.2 固体激光材料	(282)
10.2.1 激光的基本性能	(283)
10.2.2 激光器的构成与激光的形成——红宝石激光器	(284)
10.2.3 激光器的分类	(285)
10.2.4 固体激光材料的结构与主要性能	(286)
10.2.5 典型的激光晶体	(288)
10.3 光导纤维	(292)
10.3.1 光纤的结构及光在光纤中的传输原理	(292)
10.3.2 光纤的传输特性	(293)
10.3.3 典型的光纤材料	(295)
10.3.4 光纤的应用	(301)
10.4 光子晶体	(302)
10.4.1 光子晶体的概念	(303)
10.4.2 光子晶体的制备	(304)
10.4.3 光子晶体的应用	(308)
习 题	(309)
主要参考文献	(310)