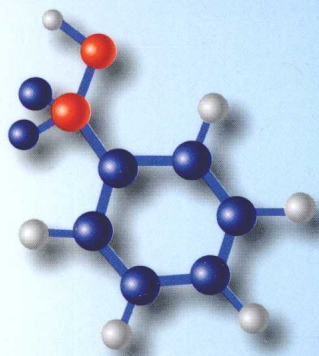




21世纪全国高等院校材料类**创新型**应用人才培养规划教材



MATERIALS

智能材料与结构系统

主 编 张光磊 杜彦良

Materials



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

智能材料与结构系统

主 编 张光磊 杜彦良



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书以材料—器件—结构—系统为主线,将基本理论与工程应用紧密结合,从材料与智能、智能材料、智能器件、智能材料结构和智能结构系统等方面循序渐进地介绍了智能材料与结构系统的基本概念、性能特征、发展和应用等。本书列举了很多实用性和工程性很强的实例,融入了最新的科研成果,反映了智能材料结构领域的最新动态和进展。

本书可作为高等院校材料类专业的本科生或研究生的专业教材,也可作为相关专业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

智能材料与结构系统/张光磊,杜彦良主编. —北京:北京大学出版社,2010.8

(21世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-17661-0

I. ①智… II. ①张… ②杜… III. ①智能材料—高等学校—教材 IV. ①TB381

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 161235 号

书 名:智能材料与结构系统

著作责任者:张光磊 杜彦良 主编

策 划 编 辑:童君鑫

责 任 编 辑:宋亚玲

标 准 书 号:ISBN 978-7-301-17661-0/TG·0010

出 版 者:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址:<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱:pup_6@163.com

印 刷 者:三河市北燕印装有限公司

发 行 者:北京大学出版社

经 销 者:新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.25 印张 233 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

定 价:28.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024

电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

编审指导与建设委员会

成员名单（按拼音排序）

白培康（中北大学）	陈华辉（中国矿业大学）
崔占全（燕山大学）	杜彦良（石家庄铁道大学）
杜振民（北京科技大学）	耿桂宏（北方民族大学）
关绍康（郑州大学）	胡志强（大连工业大学）
李楠（武汉科技大学）	梁金生（河北工业大学）
林志东（武汉工程大学）	刘爱民（大连理工大学）
刘开平（长安大学）	芦笙（江苏科技大学）
石海芳（辽宁工程技术大学）	孙凤莲（哈尔滨理工大学）
孙玉福（郑州大学）	万发荣（北京科技大学）
王春青（哈尔滨工业大学）	王峰（北京化工大学）
王金淑（北京工业大学）	卫英慧（太原理工大学）
伍玉娇（贵州大学）	夏华（重庆理工大学）
徐鸿（华北电力大学）	余心宏（西北工业大学）
张朝晖（北京理工大学）	张海涛（安徽工程大学）
张敏刚（太原科技大学）	张锐（郑州航空工业管理学院）
张晓燕（贵州大学）	赵惠忠（武汉科技大学）
赵莉萍（内蒙古科技大学）	赵玉涛（江苏大学）

前 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。随着科学技术的发展，特别是 20 世纪 80 年代以来，现代航空、航天、电子、机械等领域技术的飞速发展，人们对所使用的材料性能提出了越来越高的要求，传统的结构材料或功能材料已不能满足要求，材料科学由单一的、仅具有承载能力的结构材料或功能材料向多功能化、智能化的结构材料发展。

智能材料结构是一门多学科高度交叉的新兴前沿学科，其发展潜力巨大，应用前景广阔，现已成为国际上的研究热点之一。

本书的编写就是为了培养新时代的创新型人才，扩展学生的知识面，使课堂教学能够紧跟时代发展前沿。全书采用循序渐进的模式编写，结构清晰；注重系统性和可读性；浅显易懂，又能显现科学性；基本理论与工程应用紧密结合，突出了实用性。

本书融合了相关专著和最新研究成果，以材料—器件—结构—系统为主线，全面系统地介绍了智能材料与结构这一新兴研究领域。本书共分 5 章，分别为材料与智能、智能材料、智能器件、智能材料结构和智能结构系统。

本书可作为高等院校材料类专业的本科生或研究生的专业教材或参考书，同时也可作为土木类、建筑类、交通类等工科专业领域的老师和学生以及相关专业技术人员的参考用书。

本书的第 1、2、3 章由石家庄铁道大学的张光磊编写，第 4、5 章由石家庄铁道大学的杜彦良编写。全书由张光磊统稿。

本书在编写过程中，得到了 21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材编审指导与建设委员会、北京大学出版社及编写人员所在工作单位的支持与帮助，在此深表谢意！

本书参考了大量的著作、教材和技术资料，在此谨对这些著作、教材和技术资料的编著者表示衷心的感谢！同时也感谢那些从事智能材料与结构方面研究的科学家和技术人员，是他们孜孜不倦的科学研究与创新思维促进了这个新领域的不断发展。本书在编写过程中还得到了孙宝臣教授、付华副教授等课题组相关老师和编者学生的大力帮助，在此深表谢意！

由于编者水平有限，书中疏漏之处在所难免，恳请广大教师、学生和其他读者批评指正。

编 者
2010 年 6 月

目 录

第 1 章 材料与智能 1

- 1.1 材料与社会 2
- 1.2 材料的智能化 4
 - 1.2.1 生物信息 4
 - 1.2.2 生物材料智能化 6
 - 1.2.3 功能材料智能化 9
 - 1.2.4 结构材料智能化 12
- 1.3 材料的机敏度和结构的智商 13
- 综合习题 17

第 2 章 智能材料 18

- 2.1 智能材料的定义与分类 19
 - 2.1.1 智能材料的定义 19
 - 2.1.2 智能材料的度量指标 20
 - 2.1.3 智能材料的分类 21
- 2.2 智能材料的特征与功能 21
- 2.3 智能材料的设计思路 23
- 2.4 典型的智能材料 24
 - 2.4.1 光纤 24
 - 2.4.2 形状记忆合金 28
 - 2.4.3 形状记忆聚合物 34
 - 2.4.4 压电材料 37
 - 2.4.5 磁致伸缩材料 42
 - 2.4.6 电致伸缩材料 43
 - 2.4.7 电流变体材料 45
 - 2.4.8 磁流变液 47
 - 2.4.9 疲劳寿命丝(箔) 49
 - 2.4.10 聚合胶体 50
- 综合习题 52

第 3 章 智能器件 54

- 3.1 传感元件 55
 - 3.1.1 光纤传感器 55

- 3.1.2 电阻应变丝 58
- 3.1.3 压电传感器 59
- 3.1.4 疲劳寿命计 61
- 3.1.5 碳纤维水泥石压敏
传感器 61
- 3.1.6 半导体传感元件 62
- 3.2 驱动元件 62
 - 3.2.1 压电陶瓷驱动器 64
 - 3.2.2 压电陶瓷微位移装置 65
 - 3.2.3 形状记忆合金驱动器 66
 - 3.2.4 电致伸缩传动器 66
 - 3.2.5 磁致伸缩材料微位移
驱动器 67
 - 3.2.6 汽车电流变液变速箱 68
 - 3.2.7 磁流变阻尼器 68
 - 3.2.8 聚合胶体驱动器 69
- 3.3 控制元件 69
 - 3.3.1 压电摩擦耗能器 70
 - 3.3.2 声纳系统 70
 - 3.3.3 伺服领域的应用 70
 - 3.3.4 静应力传感领域 71
 - 3.3.5 智能复合材料结构 71
- 综合习题 75

第 4 章 智能材料结构 76

- 4.1 智能材料与结构的定义和分类 78
 - 4.1.1 智能材料与结构的概念 78
 - 4.1.2 智能材料与结构的分类 78
- 4.2 智能材料与结构的研究范围和应用前景 78
 - 4.2.1 智能材料与结构的
研究范围 78
 - 4.2.2 智能材料与结构的应用
前景及发展趋势 79



4.3 智能材料与结构的信息处理方法	80
4.3.1 模式识别方法	81
4.3.2 小波分析	84
4.3.3 时间有限元分析	87
4.3.4 神经网络	88
4.4 自诊断智能材料结构	88
4.4.1 结构的强度自诊断	89
4.4.2 损伤自诊断智能材料结构	93
4.4.3 载荷自诊断系统	95
4.4.4 诊断与监测中的光纤光栅传感技术	96
4.4.5 空心光纤传感的智能结构自诊断	99
4.5 自适应智能材料结构	102
4.5.1 强度自适应智能结构	104
4.5.2 形状自适应智能结构	104
4.5.3 载荷自适应结构	108
4.5.4 减振降噪自适应结构	108
综合习题	112
第5章 智能结构系统	113
5.1 光纤在线实时监控系统的	114
5.1.1 树脂基复合材料成形过程的基本模型	115
5.1.2 光纤固化监测传感器的研究现状	118
5.1.3 应用多模模斑谱光纤传感器监测复合材料固化过程	120
5.1.4 应用光纤微弯传感器监测复合材料固化过程	122
5.1.5 复合材料成形工艺过程在线控制专家系统	123
5.1.6 在线监控系统在其他领域的应用	125
5.2 振动主动控制系统	128
5.2.1 凸轮机构的振动主动控制系统	129
5.2.2 连杆机构的振动主动控制系统	131
5.2.3 基于压电元件的振动主动控制系统	132
5.3 大型结构温度场实时监测系统	136
5.3.1 背景	136
5.3.2 测温系统的组成	137
5.3.3 温度监测系统软件设计	138
5.3.4 应用与结论	139
参考文献	151

第 1 章

材料与智能



本章学习目标

- ★ 掌握材料在社会中的地位；
- ★ 了解材料发展的几个历史阶段与未来趋势；
- ★ 了解功能材料智能化的进程与典型实例；
- ★ 掌握材料的机敏度和结构的智商。



本章教学要点

知识要点	能力要求	相关知识
材料与社会	掌握材料在社会中的地位，了解材料发展的历史与趋势	材料的分类；材料与人类社会的发展
材料的智能化	了解生物信息的应用与发展，了解功能材料智能化的进程与典型实例	智能机器人；智能化城市
材料的机敏度和结构的智商	掌握材料的机敏度和结构的智商，了解评价材料机敏度和智能结构的方法	材料的性质与评价



导入案例

世界最强壮昆虫外壳有望制成智能材料

世界上最强壮的动物是一种叫做“独角仙”的昆虫(图 1.1),虽然它是一种小型昆虫,却能够搬动相当于自己体重 850 倍的物体。它的神秘之处不仅于此,科学家还对它外壳的变色功能感兴趣。目前,一项最新研究揭示了它奇特的外壳保护特性,利用这一特征可用来设计新型“智能材料”以探测湿度变化。



图 1.1 强壮的“独角仙”

独角仙的外壳可以随着外界空气湿度增加其颜色由绿色变成黑色。来自比利时纳米尔大学的研究人员采用最新的扫描电子显微镜成像技术研究独角仙外壳颜色的变化特性,并用分光光度计分析外壳结构如何与光线发生交互影响。

负责此项研究的纳米尔大学研究员玛丽·拉萨特说,“独角仙所呈现的外壳结构特征,将成为未来一种‘智能材料’的重要特性,科学家可以依据这种特征研制作作为湿度探测器的新型材料,它可用在食品加工厂监控湿气指数。”这项研究内容已发表在 2008 年 3 月 11 日出版的《新物理学杂志》上。

20 世纪 70 年代人们把信息、材料和能源誉为当代文明的三大支柱。同时,新技术革命的重要标志是新材料、信息技术和生物技术。随着时代的进步,材料也不断向高性能、多功能化方向发展。其中,材料的智能化以及具有智能特性的材料逐渐成为研究的一个热点,也必将为人类改造世界的能力带来巨大的突破。本章首先从材料与社会的关系出发,介绍了各种材料的智能化进程与应用。

1.1 材料与社会

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器或其他产品的物质,是人类生活和生产的基础,是人类认识自然和改造自然的工具。人类文明被划分为旧石器时代、新石器时代、青铜器时代、铁器时代等,由此可见材料的发展对人类社会的影响有多大。材料也是人类进化的标志之一,任何工程技术都离不开材料的设计和制造工艺,一种新材料的出现,必将促进文明的发展和技术的进步。从人类的出现到 21 世纪的今天,人类的文明程度不断提高,材料及材料科学也在不断发展。在人类文明的进程中,材料大致经历了以下五个发展阶段。

1. 使用纯天然材料的初级阶段

在远古时代,人类只能使用天然材料(如兽皮、甲骨、羽毛、树木、草叶、石块、泥

土), 相当于通常所说的旧石器时代。这一阶段, 人类所能利用的材料都是纯天然的, 在这一阶段的后期, 虽然人类文明的程度有了进步, 在制造器物方面出现了种种技巧, 但都只是对纯天然材料的简单加工。

2. 人类单纯利用火制造材料的阶段

这一阶段横跨人们通常所说的新石器时代、青铜器时代和铁器时代, 也就是距今约10000年前到20世纪初的这么一个漫长的时期, 并延续至今。它们分别以人类的三大人造材料为象征, 即陶、铜和铁。这一阶段主要是人类利用火来对天然材料进行煅烧、冶炼和加工的时代, 如用天然的矿土烧制陶器、砖瓦和陶瓷, 以后又制出了玻璃、水泥, 并从各种天然矿石中提炼铜、铁等金属材料, 等等。

3. 利用物理与化学原理合成材料的阶段

20世纪初, 随着物理、化学等科学的发展以及各种检测技术的出现, 人类一方面从化学角度出发, 开始研究材料的化学组成、化学键、结构及合成方法, 另一方面从物理学角度出发, 开始研究材料的物性, 就是以凝聚态物理、晶体物理和固体物理等作为基础来说明材料组成、结构及性能之间的关系, 并研究材料制备和使用材料的有关工艺性问题。由于物理和化学等科学理论在材料技术中的应用, 从而出现了材料科学。在此基础上, 人类开始了人工合成材料的新阶段。这一阶段以合成高分子材料的出现为开端, 一直延续到现在, 而且仍将延续下去。人工合成塑料、合成纤维及合成橡胶等合成高分子材料的出现, 加上已有的金属材料和陶瓷材料(无机非金属材料), 构成了现代材料的三大支柱。除合成高分子材料以外, 人类也合成了一系列的合金材料和无机非金属材料。超导材料、半导体材料、光纤等材料都是这一阶段的杰出代表。

从这一阶段开始, 人们不再是单纯地采用天然矿石和原料, 经过简单的煅烧或冶炼来制造材料, 而是利用一系列物理与化学原理、现象来创造新的材料, 并且人们可以在对以往材料组成、结构及性能之间关系的研究基础上, 根据需要进行材料设计。使用的原料本身可能是天然原料, 也可能是合成原料。而材料合成及其制造方法更是多种多样。

4. 材料的复合化阶段

20世纪50年代金属陶瓷的出现标志着复合材料时代的到来。随后又出现了玻璃钢、铝塑薄膜、梯度功能材料以及最近出现的抗菌材料, 都是复合材料的典型实例。它们都是为了适应高新技术的发展以及提高人类文明程度而产生的。到这时, 人类已经可以利用新的物理、化学方法, 根据实际需要设计性能独特的材料了。

现代复合材料最根本的思想不是要使两种材料的性能变成3加3等于6, 而是要想办法使它们变成3乘3等于9, 乃至更大。

严格地说, 复合材料并不只限于两类材料的复合, 只要由两种或两种以上不同物质以不同方式组成的材料都可以称为复合材料。

5. 材料的智能化阶段

自然界中的材料往往都具有自适应、自诊断和自修复的功能。如所有的动物或植物都能在没有受到绝对破坏的情况下进行自诊断和修复。人工材料目前还不能做到这一点。但是近三四十年研制出的一些材料已经具备了其中的部分功能, 这就是目前最吸引人们注意



的智能材料,如形状记忆合金、光致变色玻璃等。尽管近十余年来,智能材料的研究取得了重大进展,但是离理想智能材料的目标还相距甚远,而且严格来讲,目前研制成功的智能材料还只是一种智能结构。

材料科学的发展趋势主要集中在以下几方面:超纯化(从天然材料到合成材料),量子化(从宏观控制到微观和介观控制),复合化(从单一到复合),智能化(从被动到主动)及可设计化(从经验到理论)。当前,高技术新材料的发展日新月异,材料科学的内涵也日益丰富。下面从几个角度介绍材料的智能化发展及现状。

1.2 材料的智能化

1.2.1 生物信息

生物体均能存储信息,如脱氧核糖核酸(DNA)就存储了很长期的信息,此信息用于增强生物体的生存机会,因为基因程序使生物体适于再次存活,DNA起着重要的尚未完全认知的作用。

从高分子材料科学的观点看,DNA是生物大分子。DNA分子是由两条核苷酸链以互补配对原则所构成的双螺旋结构的分子化合物,如图1.2所示。单个核苷酸由一个五碳糖连接一个或多个磷酸基团和一个含氮碱基组成。单个核苷酸再以糖-磷酸-糖的共价键形式连接形成DNA单链。两条DNA单链以互补配对形式形成DNA双螺旋结构。其中两条

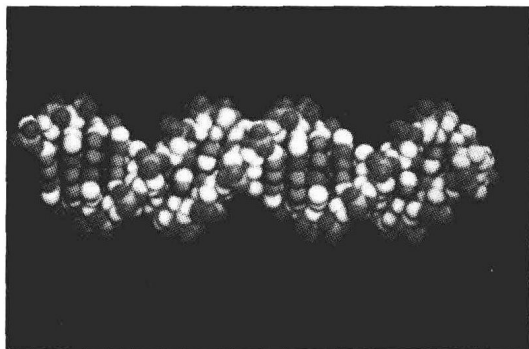


图 1.2 DNA 双螺旋结构

DNA链中对应的碱基A-T以双键形式连接,C-G以三键形式连接,糖-磷酸-糖形成的主链在螺旋外侧,配对碱基在螺旋内侧。DNA既是一个序列确定的共聚物,也是一个功能高分子。因为它的主链带负电,所以DNA是聚阴离子。DNA能被水解和酶切,属于生物降解材料。单链DNA可合成双螺旋几何图形,称为杂交,这是可逆过程,它使DNA发挥灵巧聚合物和刺激响应材料的功能。DNA的智能度也由此大分子的初级结构进行复杂性的变化而协调。

既然DNA大分子本身具有智能性,要想将其引入先进材料系统,使其具有商业价值,就需要将生物大分子与合成高分子材料整合,美国杜邦公司正从事这方面的研究与开发。下面介绍相关工作的梗概。

1. 诊断用生物传感器和杂化材料

随着基因测序的完成,最终可定位装配基因,开辟预测、诊断和预防许多病变的新途径。将一定长度与序列的寡核苷酸“探针”共价缝合在分子、膜材、电极、胶粒和光纤上,可为亲和生物传感器的开发创造条件。它们能检测到与基因疾病或致病生物体对应的独有的互补DNA链。此类新材料与其目标结合时的电化学效应、光谱、干扰等变化能被

实时监测,但仍需开发能原位检测人类病原体和生物战药剂的便携式生物传感器。

人们利用光刻技术将数百万寡核苷酸链装配在硅片上构筑了“生物芯片”,其示意图如图 1.3 所示。生物芯片是微电子技术与生物工程技术结合的产物,是一种把微电子集成电路技术与生物活性分子功能相结合、集成大量分子探针的微型生物器件。它能在短时间内对细胞、蛋白质、基因及其他与生命过程相关的物质进行大信息量检测,其效率是传统检测手段的千百倍,具有巨大的应用潜力和前景。目前,生物芯片技术应用领域主要有基因测序及分析、新基因发现、基因分析、疾病诊断和预测、药物筛选等。此外,生物芯片在军事侦察、司法鉴定等方面也有着广泛的应用。近年来在科技推动下,生物芯片技术不断取得新的进展。

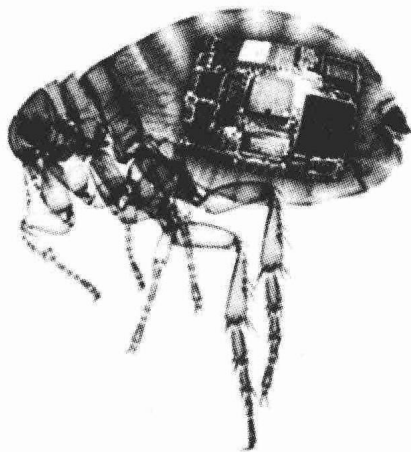


图 1.3 生物芯片示意图

科学家们还制备了含双链 DNA 碎片的杂化材料,用于迅速测定能与天然 DNA 相互作用的物种,有望在制药工业中用于促进新药开发。人们进一步将寡核苷酸衍生物附着于刺激响应高分子,开发了有多维传感行为的“灵巧”诊断装置。

2. DNA 基纳米材料

纳米技术涉及操纵和构筑纳米尺度的材料和装置,这是个相当新的领域,它与各种材料和工程领域交叉。DNA 具有独特的物理化学、生物和催化性能,其寡聚物和聚合物很适宜制备纳米材料。DNA 还可作为支架材料制备其他纳米装置,且将分子种在三维空间精确定位。一旦不再需要时,此支架能以热、光解或水解除去而得到最终纳米产品。

对于信息存储和计算系统,天然 DNA 功能优越性主要在于信息存储介质。一微小单链 DNA 的信息容量相当大,连成线形的四种常遇到的核苷酸残基可构建 65000(即 4^8)个不同的八聚体。DNA 在某种意义上可看作“分子条码”,能作为亚微观标记,因为这种标记相当稳定,易于用聚合酶链反应(PCR)复制或扩增,微量 DNA 材料用于多种用途的离散标记条目或物质。人们将 DNA 标记与刺激响应“触发物”或“开关”装配,用以调控

PCR 向下游扩增与否。此类“灵巧标记”将提供涉及标记试样历史的深层次传感信息。

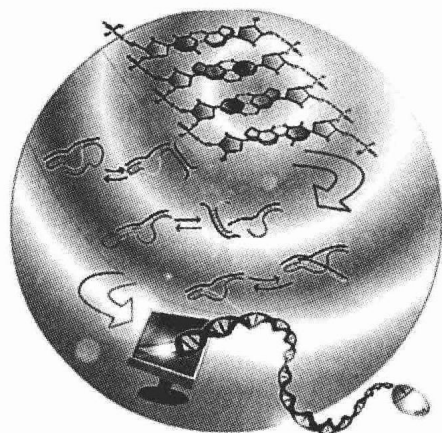


图 1.4 DNA 逻辑门

在国家自然科学基金委、中国科学院、科技部 and 上海市科委的支持下,中国科学院上海应用物理研究所的樊春海研究员与上海交通大学 Bio-X 中心的贺林院士、张治洲教授通过深入的学科交叉与合作,应用 DNA 核酶研制成功一类新型的“DNA 逻辑门”,如图 1.4 所示。虽然 DNA 计算未来潜力无穷,但是当前仍然有许多瓶颈技术和基础问题需要解决,其中基于 DNA 分子的逻辑门就是实现 DNA 计算的一个重要基础。相关研究结果已发表在著名化学杂志《德国应用化学》上。



DNA 计算是计算机科学和分子生物学相结合而发展起来的新兴研究领域。由于 DNA 分子具有强大的并行运算和超高的存储能力, DNA 计算将可能解决一些电子计算机难以完成的复杂问题, 而且也可能在体内药物传输或遗传分析等领域发挥重要作用。

核酸和硅技术结合构筑的杂化计算机, 是基于生物化学反应的单 DNA 链多重复制, 可容许大量平行计算操作。它比现在最先进的计算机容量还要大得多, 其实现有赖于 DNA 和材料系统的成功结合。

3. 由 DNA 构筑新材料

DNA 大分子的信息含量高, 它具有智能性, 利用 DNA 双链体的刺激响应性, 先在适宜客体聚合物存在下使双链 DNA 变性, 随之缓慢退火, 使双链体结构交联, 改变退火条件, 制得的材料就会具有不同结构。DNA 的钠抗衡离子与亲脂性交换, 可使其溶于有机溶剂, 此类超分子材料的物理性能有待研究。多层结构物界面区域内 DNA 的定位可孕育新材料体系, 它们在控制条件下能可逆或不可逆地分离成层。DNA 也是一种液晶聚合物, 根据外界条件呈现许多相转变, 这一行为可使杂化材料的几何形状多样化。

人类大脑可储存从数秒的短期信息到一辈子的信息, 信息源自人类的传感系统, 经分级再以不同方式处理。再一次出现同一情况时能加以复制, 并且能响应长期荷载而重建, 且进行预测。大脑还有响应功能, 会尽可能准确地预示未来。因而人们试图将大脑的此类功能度、灵巧度、智能性赋予材料。

1.2.2 生物材料智能化

生物材料(biomaterial)是用于对生物体进行诊断、治疗, 修复或替换其病损组织与器官、增进其功能的新型高技术材料。它是研究人工器官和医疗器械的基础, 已成为材料学科的一个重要研究分支, 尤其是随着生物技术的蓬勃发展和重大突破, 已成为各国科学家竞相进行研发的热点。当代生物材料已处于实现重大突破的边缘, 在不远的将来, 科学家有可能借助于生物材料设计和制造完整的人体器官, 生物材料和制品产业将发展为 21 世纪世界经济的一个支柱产业。

由生物分子构成了生物材料, 再由生物材料构成了生物部件。生物体内各种材料和部件有各自的生物功能。它们是“活”的, 也是被整体生物控制的。生物材料中有很多结构材料, 包括骨、牙等硬组织材料和肌肉、腱、皮肤等软组织材料; 还有许多功能材料所构成的功能部件, 如眼球晶状体是由晶状体蛋白包在上皮细胞组成的薄膜内而形成的无散射、无吸收、可连续变焦的广角透镜。在生物体内生长着不同功能的材料和部件, 材料科学的发展方向之一是模拟这些生物材料制造人工材料。它们可以做生物部件的人工替代物, 也可以在非医学领域中使用, 前者如人工瓣膜、人工关节等, 后者则有模拟生物黏合剂、模拟酶、模拟生物膜等。

1. 微球功能的智能化

微球常用作药物释放体系(DDS)的载体, 其智能性最初的构思主要是通过粒子形状的设计来实现的。如负载降钙素药物的乳酸和乙醇酸共聚物(PLGA)纳米微球表面经壳聚糖等黏膜黏附型高分子修饰后, 使绝食大鼠口服, 与未修饰的 PLGA 纳米球载体相比, 其血中钙的降低可持续 36h。

第二代微球的智能性与其对环境的变化(刺激)的响应性相关。如以 pH 敏感聚甲基丙

烯酸—接枝—乙二醇微球包覆胰岛素，口服时在胃内酸性条件下，大分子间形成配合物，限制了凝胶的溶胀，药物不释放。在小肠的中性和弱碱性介质中，凝胶溶胀，胰岛素释放，患糖尿病的大鼠口服 2h 后，血糖浓度明显下降。

第三代微球的智能化是基于对刺激响应的可逆性。温度响应性聚异丙基丙烯酰胺 PNIPAm 在临界溶解温度(LCST)以下的温度中凝胶迅速水合而溶胀，药物释放受到抑制。

第四代智能微球则从仿生出发，以细胞微包裹构建人工细胞。牛腓肠肾上腺嗜铬细胞能释放一组止痛剂，将纯化后的这种细胞置于微孔空心纤维内，两端密闭。植入脊柱腔内，分泌的止痛剂将通过管的微孔扩散到脊柱的神经细胞，阻断疼痛信号传输至大脑。这些微孔允许小的营养分子和氧进入植入物，同时阻止免疫体系的抗体分子和细胞与包裹的牛腓肠肾上腺嗜铬细胞接触而产生排斥反应。现在已用经纯化的牛腓肠嗜铬细胞(3×10^6 个)置于空心纤维中，两端密封，通过介入技术将其置于脊柱中。此止痛疗法正在进行临床实验。另外，以聚氨酯海绵包裹肝细胞也能形成球状体，该体系有望成为富有发展前景的人工肝。

2. 智能生物材料与组织工程

从材料科学与工程观点，可以将组织视同细胞复合材料。它由具有功能作用的细胞及其合成的细胞外基质(ECMs)构建。

组织工程是工程科学与生命科学的交叉与融合，着眼于开发细胞外基质的取代物，以修复、维持或改善组织功能。这一组织工程领域正在形成新学科，孕育着新的高科技产业。

组织工程的发展对生物材料提出了挑战，即期望它能仿照目标细胞的微环境，使细胞粘连、迁移、增殖与分化，让细胞保持其功能，实施营养物和代谢物的传递、能量传递、信息传输，以维持细胞增殖、分化和凋亡的适宜平衡，构成工程化的组织。图 1.5 所示为对组织工程相关的灵巧生物材料的构想。

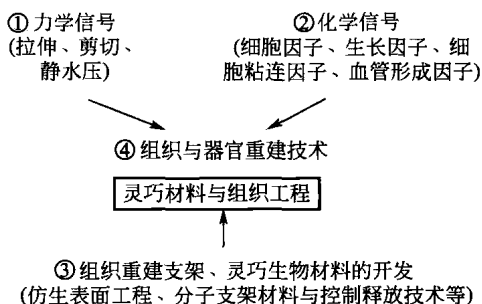


图 1.5 对组织工程相关的
灵巧生物材料的构想

3. 向生物体逼近——新陈代谢

新陈代谢是生物体医治伤残的自我修复功能的根源，这种功能已成为对工业材料的一个研制目标，就是使疲劳或龟裂的材料休息一段时间(不使用)后能恢复原来的状态。

4. 向外部告知状态的材料

生物的功能之一就是能告诉与正常情况的偏离。平时不爱动的人，偶尔运动，腿就要痛。开夜车眼就会充血，胃不好舌头就起白苔，这些都是对异常的警告信号。

因此最好让材料具备一种功能，当它在反复应力作用下疲劳，或长时间加负载产生蠕变而接近断裂时，材料本身就变色或向外部告诉这种变化情况。即使材料本身做不到这一步，也可以在材料中重要的部位埋入小的传感器(不能影响其强度)，具体哪种传感器合适，目前尚不清楚。也许光色器或受反复应力时特性发生变化的半导体能起这种作用，材料本身可变色，或能用非接触检测器从外部检测就可以了。这种功能只有在材料和电子学融合之下才有可能出现，仿效目前流行的机械电子学(mechatronics)一词，可暂时把它称



为材料电子学(Matetronics)。

5. 磨出胼胝的材料

胼胝是指皮肤等的异常变硬和增厚，又称老茧，是皮肤长期受压迫和摩擦而引起的手足皮肤局部扁平角质的增生。

图 1.6 所示为机器人人工手指的断面，在相当于骨头的硬轴周围裹着一层弹性材料，这一部分与普通的人手手指相同，所不同的是在笔杆碰到的地方不仅有弹性，而且还掺有如图 1.6(a)所示的 A、B 两种按同等比例均匀混合的微型胶囊。

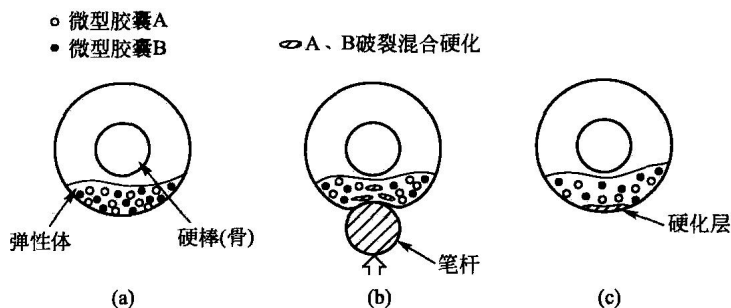


图 1.6 适应性硬化的人工手指模型

微型胶囊 A 中填充的是不饱和聚酯及其硬化催化剂的混合物，微型胶囊 B 中填充了同样的树脂和硬化促进剂的混合物。A 和 B 不会直接产生硬化反应，整个指头的柔软程度大体相同，当这种人工手指握笔写字时，因为压力加到如图 1.6(b)所示的部位上，该处的微型胶囊破裂(设计时考虑到胶囊的强度)，A 和 B 内的树脂液便混合反应而固化，只有碰到笔的地方才发生硬化现象，就像人手长胼胝。这种人工胼胝不仅可用在机器人的手上，还可以应用于人工假手上，用这种材料制作的假脚里面，未走路前就像婴儿的脚，很柔软，但走路以后根据人走路的习惯即产生适应性硬化，在脚掌和脚跟长出胼胝，巧妙地适应了外部刺激。

6. 能变软变硬的材料

可软可硬的现象，仍以手为例来解释，人手一般较软，弯曲五指可以翻花线或亲切地握手，若把拳头握紧又可砸破一块瓦。现在的人工手指虽能亲切握手，但还不能握拳砸瓦，这是因为现在的工业材料尚不能适应外部刺激(或根据相应的内部指令)进行适应性硬化。

如果有像生物体那样软硬能适应变化的材料，可做成性能完全不同的软体机械，例如，因为车体具有弹性，长、大型货车存在的外轮差问题就可以解决了，由于同样的道理，弯曲的涵洞也不必做得很宽，汽车也不需要安装减振器，因为可以把车轮设计得能巧妙变形以吸收振动。

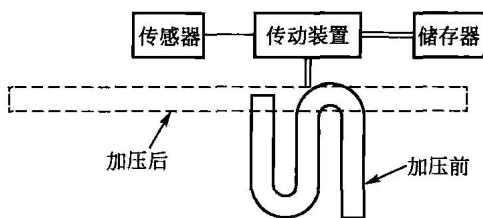


图 1.7 软硬可变的材料系统模型

这类可逆的适应性硬化材料，应如何设计呢？

最好的样板是生物体，如海绵物质中充满了液体可使自身硬化，其系统模型如图 1.7 所

示。图中的构件为圆棒，由许多合成橡胶的细管叠加起来，外面包以高强度薄膜，一端封闭，另一端和外加电源相连。加压电源由储存器、传感装置和传感器构成，平时管子内是空的，因此整个构件的刚性为零，当外部有某种(需要硬化的)刺激时，被传感器探知，通过伺服阀的传感器工作，把储存器中小的液体加压注入管子中，使该构件硬化；也可以用手动办法使联动系统工作。

但图 1.7 中理想的传感器、传动装置、储存器等并不是材料而是器件。理想情况下应把它们组装到材料的微组织中去，加压媒质可考虑使用化学液体，但恐怕反应速度太慢。

如果这种机构能做好，平时把它折叠起来存放在仓库里，一旦有事就可拿出来使用。如在洪水泛滥不能往来的地方，可拉出来用作应急便桥。

1.2.3 功能材料智能化

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、生物医学等功能，能产生特殊的物理、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。

为将信息注入系统，需要传感器阵列。以昆虫为例，昆虫通过其外皮传感所有的感觉。外皮是一种相当简单的复合材料，昆虫的神经系统仅有几个传感器，每个传感器仅有一个神经细胞。节肢动物均有坚硬的外皮，外皮的特异相关细胞具有力学传感功能，通过特定过程能将力传递且变换成膜电位，其机理尚需研究。

1. 胶原

肌肉和骨骼乃至各种细胞之所以能结合在一起，保持其空间排列，是与一种称为胶原的蛋白纤维相关的，人的躯体中总蛋白量的 25% 是胶原。胶原有许多类型，其主体为三重螺旋构成的纤维，一般三重螺旋在糖胺聚糖(GAGs)基质内稳定。胶原纤维的杨氏模量为 1~10GPa。

棘皮动物如海胆、海参、海星等的结缔组织中胶原的交联链易变化，因而能使其从刚性胶原/GAGs 复合材料变成黏性液体，采用这种材料构筑的结构可在两种状态之间变化：一种是相对刚性状态，其中胶原承受拉伸，将躯体或器官固定于一定姿态；另一种则是相对松弛状态，其中胶原是柔韧材料，它随肌肉作用或外界力刺激能改变形状或体态。这是由于胶原纤维增强 GAGs 复合材料中的糖胺聚糖为负离子多糖，钙离子引入可使多糖链交联，此交联链可控且能变化。

为开发可控刚性复合，人们采用能响应外电场由黏性流体变为固体的电流变流体作为基础。

2. 弹性蛋白

弹性蛋白的 95% 氨基酸都有疏水侧链，疏水材料的特点是它低温时水合且溶胀，高温时脱水收缩。所以它们能将热直接转变为功，改变聚合物化学调控溶胀相至收缩相的转变



温度,即所谓低临界溶解温度(LCST)。疏水性大时 LCST 会降低。科学家们制备了一系列弹性蛋白凝胶,它们能响应其他变量如 pH 值、盐浓度、压力和电能而将其转变为机械功。弹性蛋白或上述凝胶可视同计算机,可将几种输入综合成单一输出即机械功。

3. 蚯蚓皮肤几何结构

人类的肌肉由一层胶原纤维和一层肌肉束膜连成肌腱,它绕成相交的螺旋状,与蚯蚓皮肤很相似,其圆柱体积和长径比同纤维角相关,纤维角 54° 时体积最大,可收缩凝胶圆柱体起肌肉作用,调控凝胶介质的 pH 值,会使其体积变化。在水存在下增大 pH 值,凝胶溶胀,促使纤维移向最大纤维角,圆柱体发生收缩。此类系统产生的收缩力约 0.1MPa,且响应速率有待提高。

4. 实验室中生长的角膜

眼睛是心灵的窗户,角膜就是窗玻璃,它是透明且富有韧性的组织,其功能是容许光透过并保护眼内器官,角膜受伤或疾患会使它变浑浊,损及视力,甚至失明。虽可用正常角膜进行移植,但供体有限,科学家们正努力用培养的人角膜细胞构建人角膜取代物。

角膜含有三类细胞,即构成外层上皮细胞、聚集在基膜的角质形成细胞及内层的内皮细胞。采用戊二醛交联的胶原-硫酸软骨素基质作为组织基材,将人死亡后的角膜低传代细胞分别按层次种植形成基质层、上皮层和下皮层。此类结构物置于适宜的培养介质中,一旦底层的上皮融合,再将其置于空气中使它分化成多层。也可把角膜内皮放在底层,在空气-液体界面顶层与低传代人角膜细胞来构筑角膜取代物。组装的角膜取代物分化两周再应用。

角膜取代物的总体形态、透明性和组织学上均和人角膜类似。添加血纤蛋白修饰基质,可使其生成血管,这种取代物具有移植前景,但仍有许多工作要做。

5. 光驱动元件

日本学者用紫外线辐照芳基乙炔化合物单晶使其转变成蓝色,且它们的表面产生阶梯或谷槽状皱纹,将此结晶暴露于可见光,则又回复无色和平整状态,这种可逆的形状变化可望用做光驱动纳米元件。时间延长,阶梯数目增多且其高度增大,变化至少达 1nm。这是因为芳基乙炔化合物闭环使分子堆砌较紧密,在可见光下处于开环型,化合物的噻吩环旋转且拉伸,使谷槽填实或阶梯平整。这一实例说明某些结晶能在外界刺激下发生内部变化,改变其形貌,且能重新以有序方式愈合。

6. 快速响应碳纳米管传感器

人们需要化学传感器来检测微量化学物质。但现有传感器的灵敏度和响应时间仍不理想,NO₂ 和 NH₃ 传感器以半导体金属氧化物为基础,它要在 600℃ 操作才能保持高灵敏度。而一些以导电聚合物为基础传感器则灵敏度有限。英国学者将半导体单壁碳纳米管(SWNT)暴露于 NO₂ 和 NH₃ 中,发现其导电性发生迅速而显著的变化,如对于 200cm³/m³ NO₂,10s 内电导率可增大三个数量级;在 1%NH₃ 中,电导率在 2min 内降低两个数量级。这种传感响应速度要比一般化学传感器大得多。他们正在修饰碳纳米管,使其对其他主要气体如 H₂ 和 CO 有专一的敏感性,且将碳纳米管用于溶液体系以检测生物体系。目前此传感器的不足之处在于回复较迟缓,室温下碳纳米管释放分析物要数小