

306

TB381  
J47

# 智能材料 器件 结构与应用

姜 德 生

著

Richard O. Claus (美)



A0949897

武汉工业大学出版社

• 武汉 •

## 图书在版编目(CIP)数据

智能材料 器件 结构与应用/姜德生, Richard O. Claus 著. —武汉: 武汉工业大学出版社, 2000. 3

ISBN 7-5629-1537-7

I. 智… II. 姜… III. 智能材料-概论 IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 05118 号

武汉工业大学出版社出版发行

(武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编 430070)

各地新华书店经销

武汉工业大学出版社印刷厂印刷

\*

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.875 字数: 308 千字

2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 18.00 元

## 前 言

材料对科技进步和社会发展起着至关重要的作用,在世界经济高速发展的今天更是如此。智能材料、器件与结构作为一个新的领域,其研究正在以惊人的高速度发展。智能材料包括感知材料和驱动材料。感知材料是一类对外界或内部的应力、应变、热、光、电、磁、化学量和辐射等具有感知或驱动的材料,可以用它们制成各种具有传感功能的结构。驱动材料则是能对外界环境条件或内部状态变化作出响应或驱动的材料,可以用它们做成各种驱动器。智能材料结构系统则是集传感、控制和驱动于一体的材料或结构系统,通过自身的感知,进行信息处理,发出指令,并执行和完成动作,从而实现自诊断、自修复和自适应等多种功能。智能材料、智能结构主要具有以下特性:敏感特性,传输特性,智能特性,自适应特性。一般说来,一种单一的材料很难具备以上各种特性,所以往往要由多种材料组元复合或组装构成智能材料和智能结构系统。智能材料是在微观上具备以下各种特性,而智能结构则是在宏观上具备上述特性。智能材料、器件与结构是多学科交叉的一门学科,与物理、化学、力学、计算机、电子学、人工智能、信息技术、材料合成及加工、生物技术及仿生学、生命科学、控制论等诸多前沿科学及高技术领域紧密相关,一旦有所突破将推动或带动许多方面技术的发展。

目前,可用作智能材料和智能结构系统中的执行器的基础材料主要有形状记忆合金、压电材料、磁致伸缩材料、电流变液、磁流变液等,这些材料可根据外界温度、电场、磁场等的变化而使其形状、尺寸、位置刚性、流变性能、内耗及其它特性发生相应的变化,因而可具有对环境的自适应功能。可用作传感网络的材料主要有光导纤维、压电陶瓷、压电高分子材料等。其中光导纤维尤为重要,它具有目前任何其它材料都无法比拟的信息传感性能。通过分析光的传输特性(如光强、位相等),可获得光纤周围的压力、压强、电场、磁场、温度、化学

成分等多种因素的变化信息。光纤还具有灵敏度高、抗干扰能力强、耗能低、使用方便、安全等优点,从而可作为传感元件或智能材料中的“神经元”而广泛应用于智能材料和智能结构中。自组装材料是通过化学键、氢键或静电引力,使聚合物分子或纳米固体粒子在特定的基片上按照人们的需要和设计逐层组装而成的一类新型的智能材料,其研究始于 80 年代初,近几年发展很快,人们已经用自组装材料制成了特种光学器件和人工智能“肌肉”材料等,这大大拓宽了智能材料与结构的研究与应用领域。

武汉工业大学自 80 年代初就开展了对智能材料与结构的研究,尤其对光纤传感智能材料与结构系统等进行了广泛深入的研究,取得了许多成果。近几年来,他们不但研究新型基础智能材料,而且还发挥多学科联合研究的优势,大力开展智能结构系统方面的研究。他们在新型电/磁流变液、新型形状记忆合金、Tb-Py-Fe 超磁致伸缩材料等基础智能材料方面和机敏混凝土智能材料系统、电流变液智能减振系统、光纤智能钢索系统及智能结构等方面都开展了研究,取得了可喜的成果。

虽然目前在智能材料与结构的研究方面取得了令人鼓舞的进展,但其应用仍处于初级阶段,还有许多问题有待于解决。尽管如此,我们相信智能材料与结构具有光明的应用前景。我们编著了《智能材料 器件 结构与应用》这本书,以促进我国在智能材料与结构领域特别是在其应用领域中的研究和发展。书中既反映了当前国内外在智能材料器件与结构方面的最新研究动态和成果,也包括了武汉工业大学近年来在该领域的研究成果。全书共分为十章,第一章至第六章主要论述基础智能材料的定义、制备、性能及其器件,包括形状记忆合金材料、压电材料、电/磁流变液材料、磁致伸缩材料、自组装材料以及由上述智能材料组成的器件。第七章论述了光纤智能材料与器件,包括光纤的分类、制备及传感原理、光纤智能材料器件等。第八章论述智能材料与结构的信息识别与处理,包括模式识别方法、小波

分析、光纤传感信号的光时域反射计检测技术及图像显示方法等。第九章和第十章分别对自诊断智能材料结构与应用、自适应智能材料结构与应用作了介绍。光纤传感技术是智能材料、器件与结构中应用最为广泛的技术之一。布喇格光栅光纤是目前智能材料与结构中常用的材料与器件,而准分子激光器是制作光栅光纤的主要设备。由于目前系统介绍上述内容的资料较少,所以我们编写了附录一和附录二,这样既能使读者较系统地了解光纤传感器的调制原理和准分子激光器,又保证了书中各章的连贯性和紧凑性。本书涉及材料科学、力学、电学、磁学、光学、测控技术等多个学科,全书具有系统性,各章内容相对独立,由浅入深,以便各专业、各层次的人员阅读。

本书由武汉工业大学姜德生教授和美国弗吉尼亚理工大学 Richard O. Claus 教授撰写。Claus 教授是弗吉尼亚理工大学纤维与光电子研究中心主任,国际著名的智能材料与光电子专家,他多次担任 SPIE 国际智能材料与结构会议主席,并且是 Smart Materials and structure 杂志和 IOP Smart Materials Handbook 杂志编委。Claus 教授为本书写了序,并参加了本书大纲的讨论和审定,还亲自执笔撰写“自组装智能材料与器件”一章。武汉工业大学名誉校长袁润章教授为本书写了序言。袁教授在武汉工业大学倡导材料科学与信息科学相结合,智能材料与结构系统是他积极支持的重要领域之一。本书的出版得到了袁教授和他的学生的支持与参与。武汉工业大学的黄俊博士、郁可硕士和王立新高级工程师参加本书部分章节的撰写和插图绘制等诸多工作,为本书的完稿付出了艰辛的劳动。另外,武汉工业大学的研究生程铭、孙东亚、朱维佳、黄晓华、梁磊和美国弗吉尼亚理工大学的刘燕京博士等也参加了本书的撰写和绘图等工作。书中吸收了他们的研究成果。

武汉工业大学的程家骐教授、吴自遐教授、张圣佩教授、赵嘉林副教授、辛容副教授和任泽敏老师等为本书的出版做了大量的工作,武汉工业大学的瞿伟廉教授、李卓球教授、钟珞教授对本书的出版给

予了大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

武汉工业大学出版社的领导和编辑为本书的出版给予了大力支持,在此深表谢意。

由于作者水平有限,加上时间仓促,书中难免出现不妥与错误之处,敬请读者予以批评指正。

# 第一章 绪 论

## 1.1 智能材料、器件与结构的发展

材料技术是人类进步的里程碑,是各个历史时期技术革命的重要支柱,甚至成为时代的标志,如石器时代、铁器时代等。一种新材料的诞生往往会推动社会发生巨大变革。今天,随着国民经济的高速发展,信息、生命、能源、交通、环境科学、高科技产业和国防建设等对新型材料的需求比以往更迫切,对材料应用范围的广泛性,使用条件的复杂性和安全可靠性的要求也越来越高,所以研究与开发各种性能优越的新型材料,发展材料科学与工程学科是一项重要而迫切的战略任务。

智能材料与结构是近年来在世界上兴起并迅速发展的材料技术的一个新领域。

设想一下,如果混凝土能自己发现混凝土大坝里的裂缝;玻璃能根据环境光强的变化而自行改变透光率,使进入室内的阳光变暗或变亮;墙纸可以变化颜色以适应不同环境;空中飞行的飞机能自行诊断其损伤状态并自行修复等等,这就是给这些材料、结构赋予了仿生的功能,使它们具有了“智能”,这种类型的材料与结构就称为智能材料与结构。这种智能材料与结构是能对环境有感觉并产生反应的流体、合金、玻璃、陶瓷、高分子有机物等材料与结构。它们可使大坝感知混凝土构件的裂缝并能在破裂前发出警报,在飞机机身上覆盖探测疲劳的智能光纤材料,能预知飞机及其构件的损伤,它们能自己诊断损伤甚至自己修复,以延长构件寿命,保证构件的安全。

智能材料与结构是高技术新材料领域中正在形成的一门新的分

支学科,是 21 世纪的先进材料,智能材料与结构是当前工程学科发展的国际前沿,材料的“智能化”是一项具有挑战性的课题,要求材料本身具有生物所具有的高级功能,如对环境和各种信息的感知功能、自诊断和预警能力,自适应和自修复功能等。智能结构把高技术的传感器或敏感元件和结构材料及功能材料结合在一起从而赋予材料崭新的性能,使无生命的材料变得有了“感觉”和“知觉”,能适应环境的变化,不仅能发现问题,而且还能自行解决问题。智能材料与结构是一门交叉学科,它的发展不仅是材料学科本身的需要,而且可以带动许多相关学科的发展,也是国民经济建设发展的需要。目前各国有一大批各学科的专家和学者正积极致力于发展这一学科,其中包括化学家、物理学家、材料学家、机电专家、计算机专家、土木工程和航空领域的专家等。

智能材料与结构概念是美国和日本科学家首先提出的,1989 年日本高木俊宜教授将信息科学融于材料的特性和功能,提出智能材料(Intelligent materials)概念,它是指对环境具有可感知可响应等功能的新材料。美国的 R. E. Newnham 教授提出了灵巧(Smart)材料的概念,这种材料具有传感和执行功能,他将灵巧材料分为被动灵巧材料、主动灵巧材料和很灵巧材料三类。

国际上于 1988 年在美国召开了第一届“光纤机敏结构与表层”会议(Fiber Optic Smart Structure and Skins)。美、日、德、法等国科技工作者在会议上发表了不少有关智能材料、制造技术、强度分析、信号处理以及工程应用的论文和报告。此后,每年国际上都有大量文章和专利发表。智能材料应用范围越来越广,现已发展成为当代高新技术领域里的一项重要研究内容。

## 1.2 智能材料、器件与结构的基本概念

说得更完整一些,智能材料与结构是指能模仿生物体,同时具有

感知和控制等功能的材料或结构,它既能感知环境状况又能传输分析有关信息,同时作出类似有生命物体的智能反应,如自诊断、自适应或自修复等。这种材料与结构一般具有四种主要功能:①对环境参数的敏感;②对敏感信息的传输;③对敏感信息的分析、判断;④智能反应。

早期的智能材料往往是一种材料集上述四种功能于一身,因此种类极少,而且适应面很狭窄,功能单一,例如形状记忆合金(SMA)智能材料,就集上述四种功能于一体。随着科学技术的不断发展,尤其是80年代光纤传感技术和微电子技术的高速发展,给智能材料注入了新的活力和概念,科技工作者开始对智能材料的四种功能分别进行处理,分别按需要进行设计,制造多种性能优越的智能材料和结构。因此,智能材料与结构往往不是研制一种材料使之具备多种智能特性,而是根据需要在所使用的基体材料中融入某种新的材料和器件,这种融入的材料或器件一般具有某种或多种智能特性,这样使智能材料与结构的性能和应用得到了很大扩展,它可以根据人们的需要来设计和制作具有多种智能属性的智能材料和结构,它的智能特性不是在单一材料中予以表现,而往往是在最终结构体中才得以表征。由于智能材料构件需要在所使用的材料构件中融入新的材料或器件,所以目前它们主要用于复合材料中,并且对融入材料和工艺有一些共性要求。

与智能材料、结构有关的特性很多,下面对一些主要特性作介绍。

### 一、敏感特性

融入材料使新的复合材料能感知环境的各种参数及其变化。可供融入的材料很多,但必须具备对环境不同参数的敏感特性。例如常用的光导纤维传感器,就具备对多种参数的敏感特性。因为它不仅与各种复合材料有较好的相容性,而且光纤传感技术的发展使得光导纤维本身就可以制成能检测力、热、声、光、电等物理参数的几百种传

感器;它体积小,种类多,而且能测量多种物理参数及其分布状况,是一种较理想的基础智能材料。目前常用的具有敏感特性的智能材料还有形状记忆合金、压电陶瓷等。

## 二、传输特性

智能材料与结构不仅需要敏感环境的各种参数,而且需要在材料与结构中传递各种信息,其信息传递类似人的神经网络,不仅体积微小,而且传递信息量特大。目前用于智能材料中信息传递的方法很多,最常用的是用光导纤维来传递信息。据医学专家介绍,光导纤维的构造和人的神经构造相近,国外很多报导也把融入智能材料与结构中的光纤比之为玻璃神经网络。

## 三、智能特性

智能特性是智能材料与结构的核心,也是智能材料与普通功能材料的主要区别,智能材料与结构除了能敏感、传输环境参数外,还应能分析,判断其参数的性质与变化,具有自学习、自适应等功能。经过学习和“训练”的智能材料与结构能模仿生物体的各种智能,由于计算机技术的高度发展,智能材料与结构的智能特性已经或正在逐步实现,问题的关键是如何将材料敏感的各种信息通过神经网络传输到计算机系统。现在一般有二种方法,一种是在大型智能结构系统中,将智能材料敏感到的各种参数传感到结构体系的普通计算机内;另一种是在智能材料中埋入超小型电脑芯片,国外已研制成的这类芯片比人体血管还细。总之材料的“智能化”是一项十分有意义的工作,许多研究目前才刚刚开始,前景是十分诱人的,有待广大科技工作者努力工作,相信不久具有更高智能特性的智能材料和结构将产生。

## 四、自适应特性

这个特性主要是由智能材料中的各种微型驱动系统来实现。该系统是由超小型芯片控制并可作出各种动作,使智能材料自动适应环境中应力、振动、温度等变化或自行修复各种构件的损伤。目前常

用的微型驱动系统有形状记忆合金,磁致伸缩材料,电流变体等,尤其是电流变体材料在自适应材料中的应用特别引人注目。

### 五、相容性

相容性的内容很多,原则上是以埋置的材料性质与原构件的材料基质的性质越相近越好。下述几种相容性是最需要考虑的。

(1)强度相容:埋置材料不能影响原材料的强度或者说影响很小。例如,在混凝土中埋入少量碳纤维,它不仅不会影响原混凝土的强度,还有增强作用。而埋入碳纤维的混凝土可能具有多种敏感特性。

(2)界面相容:埋入材料的表面和原材料有相容性。例如,在智能复合材料中常需埋入光导纤维,由于普通复合材料中有玻璃纤维,因此它们有良好的相容性,但在碳纤维复合材料中必需将埋入的光导纤维表面碳化处理,它们才有较好的界面相容性。

(3)尺寸相容:埋入材料或器件和原材料构件相比,体积应很小,不影响原构件特性。光导纤维体积很小(直径仅几十微米),是目前机敏复合材料中最常采用的埋入材料。

(4)场分布相容:埋入材料与器件不影响原材料构件各种场分布特性,如应力场、振动模态等。

智能材料、器件与结构之间有非常密切的关系,智能材料是基础,智能结构是成品,智能器件是连接智能材料与结构的桥梁。当考察某生物体,例如人的智能特性如何时,我们说构成人体的各种材料,如,皮肤、骨骼、神经等是人的基础,但离开了整个人而单独考核某种人体的材料的智能特性是没有意义的。人的智能特性是以整个人的形式而存在的,同时人体和人体材料是以器官(如四肢、五官等)形式连接或构成的,因此在学习和研究智能材料、器件和结构时,我们要充分了解它们之间的区别和相互关系,不仅要重视智能材料与结构,同时也要充分注重智能器件的重要作用。

## 1.3 智能材料、器件与结构的研究、设计和应用

### 1.3.1 研究内容

智能材料、器件与结构是一门综合性的边缘科学,它包括材料科学、物理、化学、计算机仿生学技术、机电工程、结构工程等多学科领域,涉及内容很多,主要有下面几方面内容。

#### 一、基础智能材料研究

基础智能材料是智能器件和结构的基础,许多材料本身就具有某些“智能”特性,例如一些材料的性能如颜色、形状、尺寸、机械特性等随环境或使用条件的变化而改变,具有学习、诊断和预见的能力,以及对信号的识别和区分能力。还有一些材料的结构或成分可随工作条件变化,从而具有一种对环境自适应、自调节的功能。还有一些材料的电性能及阈值,光性能及阈值以及其它物理或化学性能随外部条件的不同而变化,因而除了具有识别和区分信号、诊断、学习和刺激能力外,还可发展成具有动态自动平衡及自维修的功能。具有各种独特功能的可用于构造智能器件和结构的基础智能材料还在不断发展、丰富和完善中。目前可用于智能结构的智能材料主要有形状记忆智能材料、压电智能材料、电/磁流变液智能材料、磁致伸缩智能材料,光纤智能材料等。近年来发展起来的自组装智能材料可以按照人们的需要以分子量级的尺度设计和制作,这是一类具有一种或多种智能特性的新材料,因而日益得到科技人员的重视。这些基础智能材料是构成智能结构的基础、核心和单元,它们的主要特性和功能如下。

#### (1) 形状记忆基础智能材料

形状记忆智能材料是一类具有形状记忆功能的材料,其产生形状记忆效应的最根本原因是马氏体相变。在合适的温度下马氏体相与母相能发生可逆的变化。形状记忆合金材料的制备方法主要有熔

炼,铸造,冷、热加工等方法,加入少量稀土元素等添加剂可以显著改善形状记忆合金的性能。由于形状记忆合金材料集自感知、自诊断和自适应功能于一体,故具有传感器、处理器和驱动器的功能,是一类具有特殊功能的智能材料。人们不但可以利用形状记忆合金来制备各种智能器件和结构,而且还可以用形状记忆合金来进行智能材料设计,并对智能材料与结构进行主动控制。这就进一步拓宽了形状记忆合金智能材料的应用领域。

### (2) 压电基础智能材料

压电智能材料是一类具有压电效应的材料。具有压电效应的电介质晶体在机械应力的作用下将产生极化并形成表面电荷,若将这类电介质晶体置于电场中,电场的作用将引起电介质内部正负电荷中心发生相对位移而导致形变。由于压电材料具有上述特性,故可实现传感元件与动作元件的统一,从而使压电材料广泛地应用于智能材料与结构中,特别是可以有效地用于材料损伤自诊断自适应,减振与噪声控制等方面。常用的压电材料主要是压电陶瓷,按其组成又可分为单元系、二元系和三元系压电陶瓷。而最近发展的压电复合材料是将压电陶瓷聚合物按一定的比例、连通方式和空间几何分布复合而成,具有比常用压电陶瓷更优异的性能。

### (3) 电/磁流变液基础智能材料

电流变液和磁流变液是两类非常重要的智能材料。它们通常由固体微粒分散在合适的液体载体中而制成,在外加电场或磁场的作用下,电流变液和磁流变液的剪切应力、粘度等流变性能会发生显著的可逆变化。这种优异性能使它们在很多方面得到应用,电流变液和磁流变液的研究也引起了国内外越来越广泛的兴趣。人们不仅对影响电流变液的电流变性能的因素(如固体微粒的大小、浓度及其化学性质,载液的性质,水的含量等)进行了系统的研究,而且还研制出由高分子化合物的固体微粒组成的电流变液。例如,由聚甲基丙烯酸锂盐、聚乙烯醇、聚苯胺等组成的电流变液,其性能较好。在电流变液

的应用方面,人们除了研究将电流变液用于阻尼器、离合器、激振器、安全阀等方面外,还把电流变液用于民用建筑物的抗振减振作为一个重要的研究方向,在这方面的研究已经取得了可喜的进展。对于磁流变液,为了提高其稳定性和获得较大的剪切应力,人们尝试用有机-无机复合微粒来组成磁流变液,如将羧基铁粒子用偶联剂处理后分散在硅油中组成磁流变液,将铁粉与高分子化合物或表面活性剂形成复合微粒以组成磁流变液等等。人们对磁流变液的结构模型也进行了研究,得出了在外加磁场作用下,磁流变液流变性能的改变与其微结构(颗粒的拉长及其定向排列的角度)、外加磁场强度及剪切速率的变化之间的关系。对磁流变液应用方面的研究,则主要集中在将磁流变液用于汽车离合系统,刹车系统、阻尼器、密封、抗振减振等方面。

#### (4)磁致伸缩基础智能材料

磁致伸缩效应是指磁性物质在磁化过程中因外磁场条件的改变而发生几何尺寸可逆变化的效应。而磁致伸缩智能材料是一类磁致伸缩效应强烈,具有高磁致伸缩系数的材料,也就是说,它是一类具有电磁能/机械能相互转换功能的材料。磁致伸缩材料通常分为金属磁致伸缩材料和稀土-铁( $\text{RFe}_2$ )超磁致伸缩材料两大类。由于稀土-铁( $\text{RFe}_2$ )超磁致伸缩材料具有比传统磁致伸缩材料大得多的磁致伸缩值,并且机械响应快,功率密度大,耦合系数高,在智能材料结构领域中具有较好的应用前景。目前这类材料已广泛用于声纳系统,大功率超声器件、精密定位控制、机械致动器,各种阀门和驱动器件等方面。

#### (5)自组装基础智能材料

自组装智能材料是在特定的基片上,通过化学键、氢键或静电引力将聚合物分子或聚合物与无机纳米粒子的复合物逐层组装上去,以形成单层、双层或多层自组装薄膜材料。近几年来,静电自组装薄膜材料发展很快。这种材料具有薄膜厚度可精确控制到分子水平、薄

膜与基体以及薄膜与薄膜之间结合力强、薄膜厚度与成分均匀等特点,在非线性光学材料、光学器件等方面有着重要的潜在应用。

#### (6) 光纤基础智能材料

光导纤维是一种圆柱介质光波导,它能够约束并引导光波在其内部或表面附近沿轴线方向向前传播。由于光纤具有感测和传输双重功能,并且有直径小、柔韧易弯曲、质量轻、抗电磁干扰等优点,因此,光纤已成为一种非常重要的智能材料,光纤传感技术则已成为智能材料的主要技术基础之一。光纤传感技术在智能材料与结构中主要用于检测材料受力、损伤情况,结构状态监测及振动主动控制等。用光纤组成的各种传感器可测量温度、压力、位移、应力、应变等多种物理量,并具有极高的灵敏度。

### 二、自诊断智能材料、结构的研究

自诊断智能材料、结构是智能材料、结构中最简单最基础的一种形式,它是一种不完备的智能形式,它往往只具备智能特性四个主要特性中的二种或三种,这一类智能材料能接受和响应外部环境参数的变化,能够自诊断内部运行状态,如缺陷或损伤等,并能根据预先约定给予报警或传输有关信息,但不具备驱动和自适应的功能。例如对于结构材料,人们期望材料内部的劣化和损伤以及表面的微细裂纹形成时,能自行监测,在形成重大事故或内部变异之前能够有效地预知或报警。这一类智能材料和结构虽然比较简单,但它是所有智能材料和结构的基础,而且在目前实用的智能材料与结构中占有很大比例,因此研究、掌握它的有关原理、特性与应用仍有很重要的意义。

### 三、自适应智能材料和结构的研究

自适应智能材料与结构是一种完备的智能体系,它具备智能材料与结构的四个基础属性,它不仅能接受和响应外部的信息,而且能自动改变自身状态,以适应外部环境变化。自适应包括的含义较多,如自我回复性(形状和物理、化学性能能够自动复原),自动调节性(能够随外部环境的需要而改变自身状态),自我修复性(能根据自身

损伤状态自我修复)等。

### (1)智能材料与结构的自回复

形状记忆智能材料就是一种具有形状自回复功能的智能材料。无论将该材料拉伸或弯曲成何种复杂形状,只要一加热,又回复到原来的初始形状。其原理是利用了马氏体相变,受力后材料内晶格发生扭曲变形而显示出塑性形变,受热获得能量后晶格自动回复原状。这种形状记忆材料,已经应用于大型钢管使其结合精密和牢固。

日本柳田等人研制的一种具有自洁净功能的温度和气体传感器,能够在所测试的环境气体受污染后随时自动恢复其新鲜洁净的表层和界面。其原理是利用  $\text{CuO}/\text{ZnO}$  两种陶瓷片紧密接触制成气体传感器,碳氢化合物在一侧被吸附和分解,在另一侧被还原而离开元件材料表层,使材料表面总能接触到最新进入的被检气体,缩短了传感器的响应时间,解决了以往的气体传感器中毒劣化的问题,提高了检测的准确性,增加了使用寿命。

### (2)智能材料与结构的自适应性和自修复性

在材料的自适应功能方面,研究得比较多的是使材料表层的形状和厚度能根据需要随时自动形成。其原理类似于劳动者的手茧。经常使用手握铁锹或锄头时,手掌会自动形成一层茧皮,使用越多,茧皮越厚。手茧的形成过程是:手掌表皮反复与物体接触磨擦时,形成微细裂纹,体内物质缓慢扩散充填裂纹,裂纹内充填物隆起并变硬而保护裂纹。这是人体皮肤的自适应性,其原理可用于高温材料的保护层的形成。钛铝合金是用于高温发动机的重要高温材料,高温使用时,氧化皮层容易裂开和脱落,人们通过加入一些物质到材料中,在表皮发生裂纹时,能及时扩散进表皮的裂纹伤口内,充填裂纹,并逐渐隆起形成致密的抗氧化层而保护材料肌体部件。在高温真空器件的不锈钢中,加入 B 和 N 元素,在进入使用状态后,B 和 N 会向表层扩散并相互结合形成一层致密的 BN 高温陶瓷保护层,保护层是材料中“自生”出来的,在成分和结构上与基底之间逐渐过渡,所以结合

非常牢固。这一举解决了以往的陶瓷涂层容易剥落的问题。

### (3) 智能材料与结构的自调节

一般材料的电阻是恒定的。通电时,其电流与电压的关系服从欧姆定律。但是,有些陶瓷材料的电阻随着电压而变化,例如  $\text{ZnO}$  等,称为可变电阻。它具有根据外部电压的大小而改变自身电阻的能力,故被列入智能材料范畴。它能用作智能性电路开关。用这种可变电阻制作成加热元件时,可以自动控制自己的加热温度。这种本身具有控温能力的材料已成为高级轿车空调的核心元件。

光致变色玻璃也是一种能自行调节透光性能的智能材料。利用  $\text{Ag}^0\text{-Ag}^+$  化学状态之间的转换,能够自动屏蔽强的光线。最近的所谓智能窗(smart window),就是利用光能-电能之间转换,形成能屏蔽光线的大型透明窗口或者能够显示亮度和色彩的显示屏幕,叫做光电玻璃。

自调节智能材料的另一有趣实例,就是能够使药物定位投放。人体用药服药时,药物遍布全身,真正需要药物的病变位置,得到的药物量却很小。加大药物投放量,又会引起身体其它部位的副作用和不适感。日本科学家已经研制一种微细胶囊物质材料,能够将药物包裹后带到身体的病变部位。在病变部位胶囊物质表皮自行破裂而释放出药物,医治病变细胞。这种定向投药原理,用于农药和化肥在酸碱土壤中的定位投放,能提高效率,降低成本,减少污染,是农业技术发展的方向。

## 四、其它研究内容

智能材料器件与结构的研究内容很多,除上述三类重要研究内容之外,还有智能系统信息传输与处理,智能传感与驱动,智能材料埋入工艺,智能材料与结构集成,智能材料与结构性能评价等等。这些内容在以后章节中将会一一介绍。

### 1.3.2 智能材料、器件与结构设计

自然界的许多生物结构系统经过亿万年的演变和进化,事实上