

机敏结构与材料简介¹⁾

程 家 骥

(武汉工业大学光纤传感技术中心, 武汉 430070)

摘要 机敏结构与材料是作为第四代功能材料的智能材料,它具有类似生物体的智能,是集具有特定性能的结构或材料及对反馈信息进行转换和控制等功能于一体的复合机构。它的发展与传感技术尤其是光纤传感技术有密切关系,现已成为高科技领域的热点。介绍了机敏结构与材料的基本概念及其与光纤传感技术关系,叙述了有关的自诊断、自适应的功能材料。

关键词 机敏结构与材料,光纤传感技术,自诊断材料,自适应材料

Abstract "Smart structures and materials", which can behave with biological organism intelligence, are composite structures in which specific characteristic structures and/or materials are integrated with the transferring and controlling functions of feedback information. They will be the intelligent materials of the next generation in functional materials. The rapid development of the "Smart structures and materials" is closely related with the fiber optic sensing technique and will be the important high-tech research area. This paper illustrates the fundamental concept of the "Smart structures and materials", the relation between the "Smart structures and materials" and the fiber optic sensing technique, and the self-diagnostic and self-adaptive materials in the application of the technique mentioned above.

Key words Smart structures and materials, fiber optic sensing technique, self-diagnostic, self-adaptive materials

机敏结构与材料 (smart structures and materials) 又称智能结构与材料,是近年来在世界上刚兴起并迅速发展的构件设计的新颖技术方法。

人们可以想像机敏混凝土它自己能发现混凝土大坝内的裂缝;想像机敏玻璃能根据环境光强的变化而自动改变透光率,使进入室内的阳光变暗或变亮;想像能变化颜色的墙纸以适应不同的环境。这种机敏结构与材料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。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;在飞机身上覆盖探测金属疲劳的机敏光纤材料,能预知飞机及其他构件的损伤;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。

国际上于80年代末大力进行机敏结构与材料的研究,尤其是在国防上常用的先进复合材料构件及民用的混凝土等胶凝材料在自诊断、自适应或自修补的研究工作上取得较大的进展,给军用工业和民用工业材料赋予了新的内容。

1 机敏结构、材料概念分析

机敏(或智能)结构与材料是指能模仿生物体,同时具有感知和控制等功能材料。它既能感知环境状态,又能传输分析有关信息,同时作出类似有生命物质的智能反应,如自诊断、自适应或自修复等。机敏材料一般具有四种主要

1) 国家自然科学基金资助项目。

1994年7月4日收到初稿,1994年10月19日收到修改稿。

功能: (1) 对环境参数的敏感, (2) 敏感信息的传输, (3) 对敏感信息的分析、判断, (4) 智能反应。

早期的机敏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)材料等。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, 给机敏材料注入了新的活力和概念, 研究工作者开始对机敏材料的四种功能分别进行处理, 分别按需求设计、制造多种性能优越的机敏材料。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 Structures and Skins)^[1]。以美国为首的世界各国科技工作者在会议上发表了不少有关机敏材料、制造技术、强度分析、信号处理以及在工程中应用的论文和报告。之后, 每年国际上都有大量的文章和专利发表, 机敏材料的应用范围也越来越广, 现已发展成为当代高新技术领域里的一项研究内容。下面介绍机敏材料的基本概念及基本研究内容, 并叙述其应用领域和发展前景。

1.1 基本概念

机敏材料又称机敏结构与材料。这里不是研制一种材料使之具备某种智能特性, 而是根据需要在所使用的材料构件中埋入某种新的材料或器件, 使这种新材料或者由这种新材料制成的器件具有某种或多种智能特性。由于机敏材料构件需要在所使用的材料构件中埋置新的材料或器件, 所以目前主要用于复合材料及无机胶凝材料, 并且对埋置的材料和工艺有一些共性要求。

1.1.1 相容性

相容性的内容很多, 原则上是欲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, 在机敏混凝土中常需埋入少量碳纤维, 它不仅不会影响原混凝土的强度, 还有增强作用。

(2) 界面相容: 埋入材料的表面和原材料有相容性。例如, 在机敏复合材料中常需埋入玻璃纤维。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, 体积很小, 不影响原构件特性。光导纤维体积很小(直径仅几十 μm), 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。

1.1.2 智能性

埋入材料与器件要使新材料构件具有一种或多种智能特性, 它要求:

(1) 敏感特性: 埋入材料使新的复合材料能感知环境的各种参数及其变化。可供埋入的材料很多, 但最常用的是光导纤维传感器, 因为不仅光导纤维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, 而且能测量各种物理参数的分布状况。

(2) 传输特性: 光导纤维不仅体积小, 传输信息容量大, 而且据医学专家介绍, 光导纤维的构造和人的神经构造十分相近, 国外也常把埋入机敏材料中的光纤比之为玻璃神经网络。

(3) 智能特性: 实现这个特性, 一是埋入机敏材料中的超小型电脑芯片, 国外已研制成的这类芯片比人体血管还细; 二是埋入人工神经网络, 可由光导纤维组成。这些系统的高度并行性, 容差性以及自学习、自组织、自适应等功能, 经过“训练”可以使机敏材料能模仿生物体的各种智能。

(4) 自适应特性: 这个特性主要是由机敏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, 使机敏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。

2 机敏结构与材料基本研究内容及其应用领域

光纤传感系统与复合材料的结合,其研究工作有:光纤及其传感器在复合材料内的埋置方法,例如为测试复合材料构件内部应力、应变,需要考虑光纤器件埋置的叠层层次、方向等;研究需埋置的光纤器件的特殊性能要求,例如用多模或单模光纤或其他特殊光纤以及传感器的最佳功能和最佳设计内容^[2-4]。尤其是复合材料内部环境性能测试,是过去长期困扰材料研究工作者的问题,如今用了埋置传感器或其他敏感材料及其信息传输方法,就有可能实现科技工作者长期的理想。这种机敏材料构件的研究内容国际上称为自诊断机敏材料。此外还研究机敏材料的控制功能,这可使材料兼有自适应或自修复的功能,称为自适应机敏材料。人们还研究了具有其他敏感功能的机敏材料。

本文着重对自诊断机敏材料和自适应机敏材料分别作介绍并叙述其应用领域和发展前景。

2.1 自诊断机敏材料

为改进复合材料固化工艺过程的经验制作而转为复合材料的内部环境的精确监控是控制复合材料构件质量的最新技术^[6-8]。由于复合材料含有纤维加强筋,在其内部埋置与复合材料兼容的光纤及感知其内部环境的光纤传感器,以测量材料构件温度变化或适时进行其他物理参数作用如外部加压等,就能控制复合材料构件的所需的品质。光纤传感器是70年代末先在国际上继而在国内逐渐发展起来的新颖传感器,它是用光导纤维作为传递信号的联接通路和作为传感环境物理参数的光纤探头而闻名于世的。它具有抗电磁干扰、能防爆、抗腐蚀、体积小、耗能低、信号能远传、灵敏度高、与计算机接口方便等突出优点。由于近十余年来的科技工作者的努力,光纤传感器及其信号检

测系统的技术逐渐成熟,特别是光导纤维与复合材料的兼容性,愈益受到机敏材料研究工作者们的青睐。

自诊断机敏材料不仅在监控复合材料构件生产过程起作用,而且也是现代常用材料的自我安全监测的无损评价技术的发展,它能更有效地检测材料构件内部的、实时的变化情况。特别是能对飞行器件运行过程中受到外界物体撞击、构件内部裂缝、损伤增长、层剥、焊接失效及构件应变变化和超载荷情况进行检测,还能对反映构件整体的参数(如振动等各种参数)进行检测,并作为构件无损评价的重要内容。采用机敏材料新技术制备的复合材料构件如直升机转子机翼已在国外作为实体实验进行了研究。

寻找一种有效的探测构件内部应变的方法,是科技工作者长期以来梦寐以求的。如今有了光纤传感器有可能实现这个梦想。国际上为探测构件内部特别是复合材料内部应变有很多方法,如光学的马赫-曾德尔光纤干涉仪、迈克尔孙光纤干涉仪、偏振光纤干涉仪、法布里-珀罗光纤干涉仪等^[9-12]。这些精巧仪器利用了光纤受应力场作用改变输入光的位相,利用干涉方法检测其位相变化而得出构件内部应变变化。

为检测构件内部损伤位置,人们还利用了计算机的巨大进展,发展了人工神经网络技术,更进而发展了光纤神经网络技术^[13]。简单说来,它是一个光并行处理器,它是由事先经过训练的神经网络组成的,能够将输入的传感器信号在空间上划分所期望的簇。神经网络的输入输出关系是用输入输出神经元的权值表示的。

国际上已在实验室内用埋置的光纤传感器网络以及人工神经网络来指示机敏材料构件内部的损伤位置,并采用计算机分析方法确定不同空间位置产生的损伤所引起的应变分布,已取得了很好的结果。这类方法特别对于传统的评估飞机结构方法,即拆装检查和逐个零件的检查(既费时,费用又高,还易出错)的方法来说是完全革新的方法。这种方法的未来设想是应用于飞机运行的几个阶段,如点火阶段、跑道起

飞阶段、飞行阶段和着陆阶段的实时检查,使飞机航行处于极端安全可靠的状态中^[14]。

混凝土大坝及各类民用混凝土构件的裂缝和损伤如何赋予它们有检测功能也是一个历史任务。现有的传统检测方法只能在构件的外表面测得结果,然后按理论内推而得构件内部的物理参数。为打破这个僵持局面,国内外相继开发与混凝土相兼容而又能传递信息的信号的材料,埋置于相应构件或大坝内部,用以探测内部的应变变化,使成为机敏混凝土材料构件。尤其是具有抗腐蚀、抗潮湿等性能,对大坝内部的裂缝、断裂甚至大坝的高边坡的土崩山裂作出事先警报的材料得到大力研究,有可能得到较好的结果以代替原有的传统检测方法。

航天航空事业未来发展是在宇宙空间建立空间站作为宇宙航行的中间站,这已在美国、苏联等航天事业先进国家积极展开。空间站在宇宙运行过程中,由于空间站自振动及会受到宇宙中众多飞行载体的撞击而产生有害振动,或者飞机遇到气流时使飞机发生振动噪音。为消除或降低振动的不利影响,需要有检测振动和甚至消除振动的措施。检测振动有外设的传统的力学系统;特别是有用能埋置于关键设备的构件中的光纤振动仪来传感航行器件的振动模态,用信息萃取系统来拾取光信息;还有用压电材料来传感振动噪声,压电材料由此产生电流以传感振动,它还能发出振动以降低或部分抵消所引起的噪声。光纤振动仪或压电材料之所以能引起人们注意,在于它们能埋置在机身内部而不是在外部,它与机身融为一体而成为机敏构件一种有希望的材料。

2.2 自适应机敏材料

上面所介绍的仅仅是机敏材料的一种功能——自诊断功能。科技工作者进而要使材料兼而有自适应或自修复功能。除上面所介绍的压电材料是具有自适应功能的一种材料外,科技工作者最近还推荐一种能感受电压使液态迅速变为接近固态的流体,名为电流变体的流体材料^[15,16]。这种材料原是40年代发现的材料,研究者历经半个世纪的研制,最近又引起了人

们的注意。它是由亲水性细粒悬浮于疏水性液中的悬浮体。它具有在强电场作用下由流体可逆地迅速变为固态,其响应时间极短,撤去电压,悬浮体能在1ms内立即平稳地返至原液态。其凝结特性与电场强度成比例。电流变体几乎可建立在任何类型的油类基质上,而细粒可由诸如淀粉、纤维素及其他有机物质,玻璃、陶瓷等无机物质组成。这种奇特性质可使液压系统和液压器件设计从根本上改观。在离合器中使用该流体,通过改变电场强度获得相应粘度,使输出轴转动得到调整。同样可用于减震器以改变振动的阻尼效应,使之可应用于空间站以控制有害振动。作为自适应材料的有力候选者,可以预料在电流变体基础上的微观液压流动装置,可直接联接到机器人的电脑中,还可用于直升飞机旋翼叶片,作为自动增强性叶片,来补偿材料温度变化。科技工作者使电流变体材料制备降低成本,使微处理控制装置和高压电源的工作效率提高,这类古老而先进的材料的应用潜力使人们日益受到鼓舞。

自适应材料中的重要材料还有形状记忆合金(SMA)^[17]。SMA材料是在室温下给予超过弹性范围的拉伸塑性变形,当加热至超过相变温度使残余变形消失。常用的材料有NiTi合金丝或合金箔,经过腐蚀处理以适应工作物件,其相变温度为55—60℃,用电流加热至相变温度使形状恢复。把SMA复合于工作构件中,组成受感元件和作动元件,再配以微处理机使成为优秀的机敏材料结构。它的作用是可自适应机器设备的一些特殊要求以解决工程难题。它的特性有:能自动改变几何外形以适应工作状态变化要求;自动进行热补偿以减小或消除热应力、或减小运动件与静止件间隙;能自动改变构件刚度以对构件振动作有源控制;能自动改变振动模态作有源抑制噪声;能对构件内部裂纹或损伤进行自动探测和有源控制,以提高工作安全性等。国外目前针对如何利用这类材料进行大力研究,特别是美国在这方面发展迅速,已对直升机转子裂纹探测和抑制及军舰噪声的有源控制等方面进行了实体研究,国内

有关研究工作亦有报道。

在自修复机敏材料方面,在国内已有研究室仿照生物体机制,在材料构件中埋置装有“愈合剂”的纤维作为通道来实现物质和能量的供给。当基体开裂时,纤维破裂,愈合剂从中流出可与基体材料反应实现愈合。所用基体材料为有机玻璃、水泥、聚乙烯等;愈合剂有赛璐珞、香蕉水、丙酮及其他高分子粘合剂,作为通道的纤维有塑料管或玻璃管。这样使构件赋有智慧,使桥梁和公路能自行修复裂痕。

总之,机敏材料的内容除本文所介绍的光纤、压电材料、形状记忆合金,电流变体外,还有磁致伸缩材料、电色材料、手性材料、可调介电材料、传导聚合物等。随着国内外科技工作者的努力,相信能使用的机敏材料将愈来愈丰富,相信在下个世纪必将有新的面貌出现,并对世界各国的经济产生促进作用。

3 结束语

机敏结构与材料是近年来新发展起来的一种新型智能材料构件,它具有自我诊断和自我适应等多种智能功能。其中,材料科学、物理学、电子技术、信息处理、光纤传感器、传感材料、高分子材料以至生物材料,加上计算机的飞速发展和近年来发展的人工神经网络技术,为探测、评估、控制的智能化功能形成了机敏材料的整体技术内容。我国为适应这一高新技术领域的研究热点,国家自然科学基金委员会材料与工程学部决定成立“无机智能材料”项目集团管理体系,并已举行了多次学术会议,取得了相应的成果,积极推动机敏材料研究工作取得进展。我们相信这项新材料、新理论、新方法、新技术必将在 21 世纪发出又一璀璨的光芒。

(下转第 298 页)

高分子电致发光材料

施晓晖 陈靖民 杨玉良

(复旦大学高分子科学系,上海 200433)

摘要 综述了高分子电致发光材料的最新研究进展,着重对增宽材料的发光光谱区间与提高量子效率这两个主要的研究方向作了较深入的探讨。

关键词 电致发光,高分子材料,功能材料,共轭高分子

虽然,有机半导体的电致发光现象早就被人们所熟知[1,2],而近 20 多年的实际应用采用的是无机材料,如 Si, Ge, As, P 等。这类材料制成的器件有坚固、寿命长、效率高等优点,同时也存在成本高、难加工、发光频率很难改变、蓝光材料更难获得等问题。而现代应用不仅要求器件有高亮度、低功耗,而且更注重材料的多色化、多功能显示和表面安装方便等特点,因此无机材料的局限性就更加明显。人们早就发现有机小分子的光致发光效率很高,便致力

于寻找新型电致发光材料,但有机小分子的电致发光材料稳定性差,影响器件寿命。1990年,英国剑桥大学的 Burroughes 及同事[3]提出,从共轭高分子材料中作些尝试。他们认为在分子材料中电子激发是非线性的,共轭链上电子与空穴的注入能形成自定域的激发态,可以有效地发生辐射衰变而电致发光。其次,高分子材料可得较高的纯度,有效地防止因缺陷而产生的无辐射衰减过程。目前,从事这方面工作的化学家们已得到了能辐射黄绿、橙红、蓝色