

新材料技术文集

《新材料技术文集》编辑组

中国国防科技信息中心

新材料技术文集

《新材料技术文集》编辑组

中国国防科技信息中心

前 言

新材料技术已经渗透到所有工程领域,当代每一项重大的新技术的出现,几乎都有赖于新材料技术的发展,硅材料技术对微电子工业的推动作用已人所共知。新材料主要是指那些用于制造各种新产品和新军事装备的先进或新兴材料,是整个材料领域中的精华和先导。本文集对智能材料和结构与纳米材料进行较深入的研究。

世界工业先进国家高度重视智能材料和结构与纳米材料的研究。美国 1991 年和 1995 年版的《国家关键技术报告》,分别将纳米材料与智能材料和结构列为关键技术项目。美国国防部系统的研究与发展机构、一些大公司和大学都积极从事这两类材料的研究开发。日本、德国、英国等也都积极开展这些材料的研究开发,并制订了各类发展计划。目前,美国、日本和德国的研究水平较高,处于领先地位。

智能材料和结构在建筑、汽车、航天航空、医疗和军事领域有着广泛的应用前景,并将导致许多新产品的出现,产生巨大的经济效益。纳米材料在军民用领域已得到初步应用,并显露出诱人的前景。纳米材料必将深刻影响国民经济和军事装备的发展。

II

为了有助于从事或者有志于从事新材料技术工作的科技工作者了解材料领域的新近发展,我们编辑了这本《新材料技术文集》。

夏传军和秦嵘同志对本文集的工作给予了大力帮助。

《新材料技术文集》编辑组

一九九七年七月

目 录

研 究 篇

新材料技术

——面向 21 世纪的军民两用技术	(1)
第一部分 智能材料和结构	(3)
一、赋予“生命功能”的智能材料和结构	(3)
二、智能材料和结构怎样获得智能	(6)
三、国外发展情况	(10)
四、面向 21 世纪的军民两用技术	(12)
第二部分 纳米材料	(18)
一、纳米材料的特性	(19)
二、国外研究情况	(21)
三、21 世纪重要的军民两用技术	(25)
参考文献	(30)

译 文 篇

智能材料系统——新材料时代的曙光	(31)
智能材料和结构：陆军应用的前景	(58)
用于航空航天的光纤智能结构	(69)

智能材料系统的商业机迁.....	(74)
纳米结构:下一代高性能块材和涂层	(85)
纳米粒子和纳米相材料的特性.....	(104)
纳米胶粒的特性及应用.....	(117)
纳米管揭秘.....	(126)

文 摘 篇

生物应用.....	(137)
金属团簇/纳米粉催化作用和表面化学特性 ...	(139)
金属和半导体纳米团簇的合成与催化特性.....	(141)
纳米结晶氧化铈催化材料.....	(143)
氧化镁载体的氧化铁用作氯化烃新的破坏性吸 附剂.....	(145)
纳米尺寸氧化钙与商业氧化钙在分解四氯化碳 作用中的比较.....	(147)
氯苯在氧化镁(MgO)和氧化钙(CaO)超细(纳米 级)粉体表面上的破坏性吸附	(149)
用于吸收 SO ₂ 和 CO ₂ 的纳米尺寸的氧化镁颗粒	(151)

研 究 篇

新材料技术

——面向 21 世纪的军民两用技术

李德孚 蒋宇平

朱光亚院士在 1995 年指出,材料技术是“不同工程领域产业化的共性关键技术。”事实上,当代每一项重大的新技术的出现,几乎都有赖于新材料的发展。例如,导致电子技术革命的集成电路的发展,依赖于超纯半导体硅材料和化合物半导体材料的发展。90 年代新材料的发展方向是高功能化、超高性能化、复合化和智能化。

新材料是高新技术发展的物质基础和突破口,具有特定性能的新材料有着强大的技术潜力。新材料可以显著改进国民经济各部门生产和使用的各种产品的性能。新材料也是发展国防高新技术和新一代武器系统的物质基础,其性能和水平是决定武器系统性能和水平的重要因素,而且是保证和提高武器系统生存能力的关键。由于新材料鲜明的军民两用性,世界先进国家都把新材料的研

究与开发放在特殊的地位,国民经济和国防部门的高技术(或关键技术)计划无不以新材料为其重要内容之一。例如,美国的国家关键技术计划和国防部历年的关键技术计划,以及1996年5月公布的《美国国防部国防技术领域计划》等都把新材料技术列为其关键技术项目。

新材料主要是指那些用于制造各种国民经济新产品和军事装备的先进或新兴材料,是整个材料领域中的精华和先导。按照近年来材料的分类方法,新材料可分为结构材料和功能材料。结构材料在产业化中一直发挥至关重要的作用,从日常民用和工业、建筑,到汽车、飞机、火箭、卫星等,以某种形式的结构构架获得其外形、大小和强度。结构材料包括金属结构材料、结构陶瓷、结构高分子材料和复合材料等。功能材料的使用性能主要是光、电、磁、热、声等功能性能,它是各种高新技术发展的基础和先导。功能材料按特性可分为磁性材料、电子和光学材料、隔热和隔热材料、隐身材料、高能量密度材料、梯度功能材料、纳米材料和智能材料等。智能材料是未来功能材料发展的一个重要方向。80年代兴起的纳米材料是特征尺寸介于原子、分子和块材之间,尚未被人们充分认识的新材料领域。纳米材料独特的结构使之在力、热、光、电、磁等方面具有得天独厚的特性,已成为各国关注的热点。

我们根据军民两用性的原则,从众多新材料中选择了智能材料与结构和纳米材料进行较深入的研究。

第一部分

智能材料和结构

智能材料和结构是指将信息科学软件系统渗入某种材料和结构,而使该材料的性能发生很大变化的新型材料和结构。智能材料和结构的研究与开发孕育着新理论、新材料的出现,研究工作涉及信息、电子、生物、材料等广泛的学科领域。

智能材料和结构的本质反映了具有与生物体相似的本质特征。众所周知,植物、动物和人类等一切生物体的最大特点就是环境适应性,而细胞作为生物体的基础,本身就是具有传感、处理和执行三种功能的融合材料。因此,通过对生命体的深刻认识,将“智能”或生命特征集成在材料和结构中,是创制具有仿生功能的智能材料和结构的基本设计原理。

一、赋予“生命功能”的智能材料和结构

给无生命的材料和结构赋予生命功能,是 80 年代中期以来一些先进国家正在从事的研究工作。智能材料和结构是人工创制的具有仿生功能的新一代材料和结构,

它能够感知外部环境和内部状态发生的变化,并可通过改变材料的性质或形状,对这些变化或外界刺激作出最佳响应。为获得“智能”功能,智能材料和结构应该具有三种最基本的功能^[1],即:

- 传感功能:能感觉环境变化或刺激,并能够监测自身的状态(如温度、载荷、辐射、应力、应变、内部裂纹…等);

- 处理和控制功能:能够对感觉到的信号进行甄别、放大、加工和数据处理,从而能够选择和控制对刺激所做出的响应;

- 执行功能:能够对所受的刺激做出最佳响应(如改变应力分布,结构形状,结构刚度,光、电反射特性,颜色,透气性……等)。

这三种功能是实现材料系统智能的基础,为实现这些功能,需要在材料系统中设置传感器、处理器和作动器。当这些基本功能在信息传递、能量转换的支持下协调工作时,材料系统和结构就可能实现类似生物体的自诊断、自结论、自指令、自修复、自适应等能力,甚至具有类似人类的判断、学习、决策、预测等智能功能。

从智能材料和结构的微结构尺寸来考虑,智能材料和结构可以分为“智能结构”和“智能材料”两部分。美国陆军研究局(ARO)的“智能材料和结构”计划,就是分为“智能结构”计划和“智能材料”计划两个子计划分别实施的。

1. 智能结构

指在材料系统中粘贴/植入传感器、作动器,以及处理和控制机构,从而能够感觉外界刺激和自身状态变化,并能够作出最佳响应的系统。一般来说,智能结构的能力是通过在结构表面粘贴,或在内部植入传感器网络和作动器网络,并通过控制系统来实现的。在智能结构中,传感器网络就象人体的“神经系统”,用来“感觉”外界的刺激;作动器网络类似人体肌肉,使结构系统作出响应;结构材料好比骨骼;而处理和控制系统就象大脑,用来控制智能结构处于最佳状态,从而使无生命的材料不但有了“感觉”和“知觉”,而且还能发现问题和自行解决问题。

2. 智能材料

智能材料的特征与智能结构相似,但智能材料的传感器、作动器以及处理和部分已成为系统中微结构本身的一部分,这可以理解为使智能结构中的传感器、作动器和处理器的尺寸从微米量级小至纳米量级,使它们与结构进行分子水平上的微观结合,从而得到更为均匀的物质。一般来说,这意味着需要在原子或分子水平上对材料进行设计、合成与加工。智能结构与智能材料没有本质区别,所不同的是它们的微结构的尺寸,以及智能材料将依赖于分子或原子工程将传感器、作动器和控制机构“安装”在材料中,并成为材料微结构的组成部分;而智能结构则是将微米或更大尺寸的功能器件植入母材结构中。

从发展的角度看,智能材料与智能结构相比更属于未来的技术,距离应用还较遥远。对于军事和航空航天应

用领域而言,目前国内外主要研究的是智能结构技术,特别是在复合材料中植入传感器和作动器的智能复合材料。

二、智能材料和结构怎样获得“智能”

如要赋予智能材料和结构类似生物体的感觉和主动响应功能,就需要给智能材料和结构设置“人工神经元”——传感器,“大脑”——信息处理器和控制器,以及“人工肌肉”——作动器。

1. 传感器

传感器用来感知外界环境变化和内部状态变化,收集外部和内部的信息。它必须具有可靠性、敏感性和较高的反应速度,以便能准确、迅速地收集外部和内部的信息。目前用得较多的传感器有光纤传感器、压电材料、形状记忆材料、声发射装置、电阻应变丝等。

(1) 光纤传感器 光纤传感器是智能材料和结构中应用最广泛的传感器。将光纤传感器植入材料中,材料内部的物理量(如应变、温度)的变化,将调制光的强度、相位、偏振态、频率或波长,改变输出的光信号,通过对输出信号的处理可以获得材料内部的信息。目前应用的光纤传感器主要有:偏振型光纤传感器、干涉型光纤传感器、布喇格光栅传感器、微弯光纤传感器等。其中,干涉型光纤传感器主要采用 Mich-Zehader 干涉仪、Michelson 干涉仪和 Fabry-Perot 腔干涉仪。测量的物理量主要有应

变、温度、振动、超声信号及位移或变形等。光纤传感器可用于探测疲劳裂纹、复合材料分层或其它损伤。

(2) 压电材料传感器 压电材料在应力作用下会发生极化,在两端表面间出现电位差。利用这一性质可实现机械信号向电信号的转换。其转换可用下式表征的压电方程来描述:

$$D_i = \epsilon_{ij}^* E_j + d_{iu} X_u \quad (u=1,2,3,\dots,6; j=1,2,3,\dots)$$

式中 D_i 、 E_j 、 X_u 分别是电位移、电场和应力分量, ϵ_{ij}^* 是恒应力条件下的介电常数, d_{iu} 是压电应变常数。

压电材料包括压电陶瓷、压电聚合物、压电纤维和压电晶体,其中压电聚合物聚偏二氟乙烯(PVDF)和压电陶瓷锆钛酸铅(PZT)是应用较多的压电材料传感器。

(3) 电阻应变计 在材料和结构中埋入电阻应变丝阵列,应用人工神经网络处理技术,可以将点测量扩展为面应变测量。选用合适的热处理规范,可制成直径为 $3\sim 10\mu\text{m}$,适于植入母材的温度自补偿电阻应变丝。电阻应变计用来测量材料内部的应变。

(4) 半导体集成传感器 微小的半导体集成传感器是未来智能材料和结构中的重要传感元件,它可以感受压力、辐射、温度、加速度等各种物理量,并且能对所收集的信息进行一定的处理。

2. 作动器

作动器根据处理和控制器发出的指令,对环境刺激作出最佳的响应,使智能材料和结构自适应地改变物理参数或形状。目前应用较多的作动器材料有压电材料、形

状记忆材料、电流变体、电(磁)致伸缩材料等。

(1)压电材料作动器 压电材料在电场作用下可实现电信号向机械信号的转换。这一转换可由下述方程来表达:

$$X_{\lambda} = d_{j\lambda} E_j + S_{\lambda u}^E X_u \quad (u=1,2,3,\dots,6; j=1,2,3)$$

式中, X_{λ} 、 E_j 、 X_u 分别是应变、电场及应力的分量; $d_{j\lambda}$ 为压电应变常数, $S_{\lambda u}^E$ 为恒定电场条件下压电材料的弹性柔度系数。

PZT 陶瓷是应用最广泛的压电作动器材料,其机电耦合系数可达 0.7,并具有精度高(应变在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 数量级)、驱动力大、频率响应范围较宽和能耗低等优点。

(2)形状记忆材料 包括形状记忆合金(SMA)和形状记忆聚合物(SMP)。SMA 在温度场变化作用下会产生马氏体/奥氏体相变,产生可逆变形。这一特性使其可作为良好的作动器,例如将 SMA 丝植入母材,通电加热 SMA 使其产生相变,利用其相变使材料结构产生内应力,从而改变材料的应力分布,或者通过 SMA 变形使智能材料结构改变形状。

(3)电流变体(ER) 电流变体在受电场作用时,其切变特性会在瞬间出现极大的变化,如从液体转变为固体。将 ER 植入材料内部,利用电流变体的这一性质,通过控制施加的电场可以调节材料结构的机械物理性能,如改变结构的固有频率,可用于主动振动控制。

(4)电致伸缩材料和磁致伸缩材料 电致伸缩材料在电场作用下可产生与场强的 2 次方成正比的应变。这

种电-机转换性能使电致伸缩材料可用作智能结构的作动器。电致伸缩引起的应变可写为:

$$\epsilon_{KL} = N_{klij} E_i E_j = Q_{klij} P_i P_j \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3)$$

式中, N_{klij} 和 Q_{klij} 为电致伸缩系数, ϵ_{KL} 是应变, E 为场强, P_j 为在外电场 E_i 作用下电介质的极化强度。目前实用的电致伸缩材料有铌镁酸铅(PMN)、铌镁酸铅-钛酸铅(PMN-PT)、锆酸铅镧(PLZT)和锆酸铅钡(PBZT)等。

磁致伸缩材料在受外磁场磁化时,磁畴结构的变化以及相应的磁畴自发形变的变化,可导致磁致伸缩。磁致伸缩材料包括金属磁致伸缩材料、铁氧体磁致伸缩材料和巨磁致伸缩材料。目前含镧元素的商用磁致伸缩材料 Terfenol-D ($Tb_x Dy_{1-x} - s Fe_2$, $x \approx 0.3$) 具有较大的应变值,因而备受关注。

3. 处理器与控制器

处理器和控制器是智能材料和结构的“大脑”,它要对传感器检测的信号进行甄别(排除噪声干扰和虚假信号)、放大、变换和处理,并向作动系统发出指令,以使作动器完成所需的动作响应。处理器要能够处理大量复杂的信号,有较高的运算速度,并可根据传感器的信息,如应变、温度、疲劳损伤等作出正确的决策。国外十分注意人工智能信号处理技术,如神经网络信号处理,以及自适应控制理论等的研究。

将一种或多种传感器和作动器与材料系统集成为一体,通过处理器和控制器进行信号处理和控制在原理上说,这种材料系统就具备了智能材料和结构的基本功能。

三、国外发展情况

工业先进国家高度重视智能材料和结构的研究。从事这一研究的主要国家有美、日、英、法、德、加拿大、意大利和澳大利亚等。

美国从事这一领域的研究最早,军方和一些政府机构直接参与了这项工作。1995 年白宫科技政策办公室和国家关键技术评审组提交给总统的《国家关键技术报告》,就将智能结构列入政府部门从事的与国家关键技术研究与发展有关的活动^[2]。美国参与智能材料和结构研究与发展的主要机构有美国陆军研究局(ARO)、弹道导弹防御局(BMDO)、航空航天局(NASA)、空军(主要是怀特实验室)和海军的有关机构。一些大公司,如波音、麦道、TRW、联合机身公司,以及许多大学都参与了这一领域的研究工作。军方和政府的一些机构分别制定了研究与发展计划,如 BMDO 的“自适应结构”计划、ARO 的“智能材料和结构”计划、空军与海军共同实施的“智能金属结构”计划、空军航天实验室的“智能结构/蒙皮”计划和 NASA 的“控制-结构相互作用(CSI)”计划等^[3]。其中的一些研究计划已完成基础研究,进入预研和应用研究,如 1996 年春 BMDO/TRW/美国空军,对 BMDO 的“自适应结构”计划研制的智能蒙皮,和对可用于主动振动控制的压电智能结构进行了飞行演示验证。该计划旨在采用智能结构进行主动振动控制,和采用智能蒙皮进行结

构损伤的自诊断,以及对敌方威胁实施预警。1995 年 NASA 对采用智能结构的 F-15 飞机进行了飞行试验,验证对飞机结构损伤的自诊断以及重组飞行控制系统使飞机安全着陆的能力。同年,NASA 和喷气推进实验室(JPL)对采用智能自适应结构的大型可展开空间结构进行了飞行试验。空军和海军则采用 F/A-18 飞机对智能金属结构舱壁和 T38 翼梁进行飞行试验,对飞机大型结构的自诊断进行验证。

日本早在 1984 年即着手空间应用自适应结构的研究^[4],日本航空宇宙研究所(ISAS)、东京工业大学以及一些大公司都参与了这项工作。主要研究内容包括:采用智能材料和结构实现空间结构的主动振动控制、自适应结构静态形状的精确控制、自适应可变形桁架(VGT)等。日本政府对智能材料研究给予了大力支持,目前的研究水平居世界领先地位。日本在智能陶瓷、金属系智能材料、高分子系智能材料,以及生物系智能材料和智能药物释放系统(DDS)等领域均开展了广泛的工作,其中一些研究已取得很大的进展。

欧洲智能材料和结构的研究以德、英、法、意为主。1989~1991 年,英、法、意三国的 7 家公司在欧共体支持下,完成了欧洲这一领域的第一个合作研究计划——“复合材料光学传感”(OSTIC)计划,对利用植入复合材料中的光纤传感器测量材料内部温度、动态和静态应变,以及固化监控进行了实验验证。90 年代初英国斯特拉斯立德大学成立了智能材料与结构研究所,这是欧洲这一领