

# 智能材料结构的定义及应用前景

陶宝祺 熊克

(南京航空航天大学, 南京 210016)

**[摘要]** 考虑到当前对智能材料结构尚无一明确定义, 本文将首先分析智能材料的概念和定义, 然后介绍埋入材料中的驱动元件、传感元件、控制系统的情况和存在问题, 以及智能材料结构在自诊断、自适应、预报疲劳寿命、隐身、减振降噪和人体医疗方面的应用和前景。

**[关键词]** 智能材料结构, 埋入式驱动器, 埋入式传感器, 强度自诊断, 强度自适应

## 1 智能材料结构的概念和定义

智能材料结构是将传感元件、驱动元件和控制系统结合或融合在基体材料中的一种结构。这种结构不仅具有承受载荷的能力, 还具有识别、分析、判断、动作等额外功能。具体地说, 就是具有检测(应变、损伤、温度、压力及各种制导光源)、通信(数据传输)、动作(改变结构外形和结构应力分布、改变电磁场及光学反射能力和数字选择能力、改变透气性和通风)等功能, 即结构件本身具有自诊断、自适应、自修复、自增殖、自衰减等能力。

如将基体材料看作人体的骨骼, 则智能材料结构就相当于由神经、肌肉、大脑和骨骼组成的系统<sup>[1]</sup>。因此可将智能材料结构定义为: 将具有仿生命功能的材料融合于基体材料中, 制成的构件具有人们期望的智能功能, 这种结构称为智能材料结构。仿生命功能是人们期望的功能, 如光纤埋入复合材料中就具有了解结构中的应变和温度的功能, 埋入的形状记忆合金丝可以使结构动作、改变结构的形状和应变等。因此, 融合于材料中的传感元件相当于人体神经系统, 具有感官功能; 驱动元件相当于人体的肌肉; 计算机系统相当于人的大脑, 它将根据从传感元件得到的信息指挥驱动元件动作。

当今材料科学领域可以说是复合材料时代。预计在 21 世纪将出现“智能材料时代”, 并将伴随出现一些新的学科, 如综合材料科学、精细工艺学、材料仿生学、生物工艺学、分子电子学、神经网络、人工智能等。目前智能材料结构还处于萌芽阶段, 但它将象计算机芯片一样, 飞速发展。

## 2 埋入智能材料结构中的驱动元件

能够使智能结构自适应动作的元件称为驱动元件, 它能够改变结构形状、刚度、位置、应力状态、固有频率、阻尼、摩擦阻力等。现有的驱动元件有形状记忆元件、压电元件、电流变材料、磁致伸缩材料、电致伸缩材料、磁流变体材料和热材料等。以下做一简要介绍。

---

本文于 1994 年 11 月 7 日收到。

本文部分工作获国家自然科学基金资助。

## 2.1 形状记忆元件

形状记忆合金(SMA)是智能结构中首先应用的一种驱动元件,其特点是具有形状记忆效应。将SMA在高温下定形后,冷却至室温,并施加力,使其出现残余变形。如果将SMA加热到相变温度以上,就可使SMA原先存在的残余变形消失,并回到高温下所定型的形状,随后再进行冷却加热,其形状将保持不变。上述过程可以周而复始,仿佛合金记住了高温状态赋予的形状一样,这称为单程形状记忆。如果对SMA进行特殊时效处理,在随后的加热冷却循环中,能够反复记住高温状态和低温状态两种形状,则称为双程形状记忆。对于埋入复合材料中的SMA,动作后仍使结构保持在弹性变形范围内,这种SMA具有单程形状记忆即可。利用复合材料的应变回复功能,相当于给SMA加一个预变形,可使单程SMA反复使用。形状记忆合金丝作为驱动元件的特点是:(1)可以实现多种变形形式;(2)易于和基体材料融合;(3)变形量大;(4)加热激励时能产生很大的驱动力<sup>[2]</sup>。存在的问题是:响应速度慢,低于1 Hz,加热驱动比散热回复响应速度快,应提高SMA的响应速度;目前激励动作的加热方式是采用通电加热,在某些情况下这种加热方式不安全,也不允许,故需研究新的激励方法,如激光加热等。近期在国外已研制成形状记忆塑料,将成为智能材料结构中新的驱动元件。

## 2.2 压电材料

压电元件既可作为驱动器,又可作为传感器。在该元件上施加电压,会引起元件内部正负电荷中心产生相对位移,从而造成元件变形,此现象称为逆压电效应。利用逆压电效应可将压电元件制成智能结构中的驱动器。当对压电元件施加机械力时就会引起它内部正负电荷中心发生相对位移而产生电极化,从而导致压电元件两个表面上出现符号相反的束缚电荷,电荷密度与外力成正比,这种现象称为正压电效应。利用这种效应可以制成智能结构中的温度、应变、压力等传感器。压电元件作为驱动器的主要特点是:(1)响应速度快,是记忆合金的1万倍以上。将它埋入或安装在结构件上,施加直流电压,就会造成结构件的静变形,如施加交流电压会引起结构件的振动;(2)厚度小,可安装在结构件的表面;(3)可成块大面积使用,也可切割成小块分散使用。主要问题是:驱动动作小,驱动力不大;尚需解决与基体材料融合好,不致成为夹渣<sup>[3]</sup>的问题。

## 2.3 电流变材料

电流变材料是胶质悬浮体,在外电场作用下,悬浮体迅速排列成相对有规律的链条状柱形结构,并平行于电场。这种胶体有固体特性,具有可测量刚度,其屈服剪应力随电场强度和剪应变速率的增大而增大。将它埋入材料夹层中,改变电场强度,即可作为驱动件。工业上对电流变体材料性能有最低要求,如:零场粘度,使用温度范围,无动态分离等等<sup>[4]</sup>。电流变材料作为智能结构中驱动器的主要特点是:响应速度很快,仅在1毫秒内就可将液体转变为具有固体性质的胶体。存在的主要问题是:转换电压太高,高达4 kV/mm,要求研究出低转换电压高屈服应力的电流变体配方;性能易受外界环境的影响;要求提高多次使用的稳定性和可靠性。

## 2.4 其它驱动元件

(1)磁致伸缩材料。在磁场作用下,该材料的磁畴旋转,引起材料变形。铁铈合金是典型的磁致伸缩材料。近年来出现的掺入稀土元素铈的Terfenol-D磁致伸缩材料,其应变可达0.002,超过压电材料一个数量级。它的缺点是需要磁场驱动,以及磁致伸缩效应受构件应变

的影响。(2)电致伸缩材料。这种材料在外部电场作用下会产生机械变形,铅铋铈酸盐陶瓷具有电致伸缩的效应。(3)磁流变材料。和电流变材料一样是胶质悬浮体,其屈服应力随磁场作用增大而增大,用途和电流变体相似。(4)热材料。某些半导体材料具有帕尔效应,当作用电压时,象一个热泵,埋入构件中后,可使构件产生一个温度梯度,造成构件变形。

### 3 智能材料结构中的传感元件

智能材料结构是利用埋入基体材料中各种传感元件来感受不同信息的。传感元件必须满足下列要求:(1)尺寸小且薄,不影响结构外形;(2)能和基体材料融为一体,埋入后对原材料影响小;(3)性能稳定可靠;(4)传感信号的覆盖面宽;(5)频率响应高;(6)能和结构中其它电器设备兼容;(7)受外界干扰小;(8)在构件使用温度和湿度范围内能正常工作。

智能结构中采用最早的传感元件是由光导纤维组成的网络,它具有一系列优点,如:对电磁干扰不敏感,可沿单线多路复用,光纤很细对基体材料强度影响很小,无闪光放电现象,频率响应高并能进行数据传输,光纤熔点高而不腐蚀可在高温及有害环境下工作等。分布式光纤传感器最适合用于智能结构,它可连续测量沿着光纤长度方向的物理量,得到物理量的变化与光纤长度的函数关系,对构件中进行场的实时测量。分布式光纤传感器是靠检测散射回的能量来提供分布参数的,需应用光纤时域反射技术(OTDR),相干光频域反射技术(COFDR)及非相干光频域反射技术(IOFDR)。这些设备成本高,费用大。在智能结构中还采用功能型的偏振型光纤应变传感器阵列、Mich-Zehnder干涉型光纤应变传感器、Fabry-Perot腔干涉应变传感器、少模干涉传感器等<sup>[5]</sup>。也可埋入非功能型传光光纤,作为通讯和监测外界制导光源及光电隐身用。

压电元件也是智能材料与结构中采用的主要传感元件,特别是PVDF压电薄膜型传感器,尺寸小而薄,仅20—30 μm,安装在结构表面或埋入其中,可测量结构应变、压力和温度,由于PVDF是压电聚合物,因此受到使用温度的限制。PZT压电陶瓷可用于声发射装置作为材料破损时的监测传感器,但压电陶瓷太脆,需改性才能与基体材料融合。国外正在研究压电漆和压电薄膜涂层,应用于形状复杂的智能结构中。另外,在复合材料中加入示踪颗粒,如压电颗粒,磁性颗粒和磁致伸缩颗粒等,不仅不影响基体材料的强度,同时还可测出胶接层的特性、干燥和损伤等情况。

在智能结构中用电阻应变丝组成阵列,埋入复合材料,应用人工神经网络处理,可将点应变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—10 μm适合于各种复合材料的温度自补偿电阻应变丝,埋入基体材料不影响结构强度<sup>[6]</sup>。疲劳寿命丝<sup>[7]</sup>是具有记忆性能的元件,由某种成份的康铜丝经特殊热处理制成,其电阻值随承受的应变幅值和循环次数而改变,改变量可达 $\Delta R/R=7-8\%$ 。

微小的半导体集成传感器将是未来智能结构中的主要传感元件。目前能够感受压力、辐射、温度、加速度的传感器仅1 mm<sup>2</sup>,具有尺寸小、安装较方便、成本低的优势。

## 4 强度自诊断、自适应和预报疲劳寿命的智能结构

### 4.1 强度自诊断智能结构

复合材料的力学性能、损伤检测和制造工艺比金属材料复杂得多。复合材料结构的损伤

也很复杂，为了提高结构的安全性，设计时往往把复合材料结构的安全系数定得很大，如在使用过程中能实现结构强度自诊断，就可大大节省材料，提高结构使用的安全性，并扩大复合材料在航空航天等领域的使用。

以下简介几种强度自诊断智能结构：(1)用声发射系统监测裂缝出现位置。一般在结构上需要监测的区域安装三个压电声发射接收传感器，材料破坏时会发出应力波，根据传感器接收到应力波的时间差可以判断裂缝出现的位置。如果在三个传感器之中材料出现开裂现象，则应力波首先到达三个传感器中的一个，如到达第二、第三个传感器的时间比两个传感器之间应力波传递的时间短，则表明材料开裂处在覆盖面之内，可以按双曲线定位法确定裂缝位置。早期的声发射检测设备只能检测声发射率和声发射总数，目前可采用软件滤波方法分辨出是层间摩擦还是母体材料开裂或纤维断裂等损伤现象<sup>[8,9]</sup>。(2)用图形特征识别法检测裂缝程度。利用埋入材料中的一个压电元件作为驱动器，由它发出激振波形，其它压电元件作为传感器，接收振动波。通常应首先在实验室内对无损伤构件及不同损伤或原始缺陷的构件进行试验，积累数据，确定出判断损伤程度的最佳特征参数，并编制计算机软件，以便在实际构件上应用。美国 NASA 曾用该方法对飞机机翼的铆钉松动、不同长度裂缝和积冰进行测定，效果很好<sup>[10]</sup>。(3)埋入光纤或电阻应变丝，并采用人工神经网络确定承受集中载荷，冲击的位置和程度。在材料中埋入光导纤维或电阻应变丝等传感阵列，传感阵列的安排应根据构件的形状和受力特点确定。它的数据通过高速并行采集器和人工神经网络处理，以诊断承受集中载荷和冲击载荷的位置和程度并在显示器上显示<sup>[11]</sup>。

#### 4.2 强度自适应智能结构<sup>[12]</sup>

为防止损伤的扩展，我们采用直径为 0.5 mm 的国产 SMA 丝，预拉伸 6%，并制成框形，埋入复合材料板件的上、下表面附近，然后在框的中间打孔，模拟飞机翼面承受鸟撞或枪击损伤，激励 SMA 丝，可测得孔边均为压应力。实验表明：可以利用上述方法来改变构件中的应力状态，使结构中应力重新分布，防止损伤扩展。为了了解埋入框形 SMA 丝对复合材料的影响，进行了疲劳试验。试验结果是：埋入并激励 SMA 丝的试件的疲劳寿命最高，加载循环  $10 \times 10^4$  次没有断裂；不激励情况下，仅  $2.4 \times 10^4$  次就断裂；如果试验中没有埋入 SMA 丝，仅  $2.1 \times 10^4$  次就断裂了。这表明，在复合材料中埋入少量 SMA 丝，并不影响材料的强度。

图 1 是在复合材料板中埋入偏振相位型光纤和形状记忆合金丝，并采用高速并行处理器和人工神经网络实现整块板的强度自诊断、自适应的系统图。由高速并行处理器采集光纤输出的应变信号，经人工神经网络处理，判断出板件上的损伤情况，然后控制激励器，激励相应位置的 SMA 丝，从而改善结构的应力状态。

#### 4.3 预报构件疲劳寿命智能结构

考虑各种可能受力工况，在构件中最大应变和可能出现破坏处埋入疲劳寿命丝，经过在各种应变载荷下的模型试验，直至破坏，定出疲劳寿命丝的阻值变化与构件寿命的关系。如在飞机上使用时，由人工神经网络处理多路数据，与模型试验值比较，确定构件的剩余疲劳寿命，这样就能将以往飞机主要承力构件由定期更换

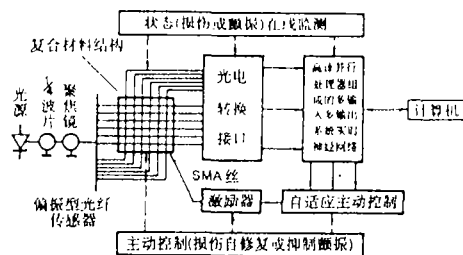


图 1

改为监测更换,大大降低飞机维修成本。

## 5 减振降噪主动控制的智能结构

在结构件中埋入驱动件可以抑制振动和噪声。我们采用 $300\times 40\times 4$ 的玻璃纤维复合材料悬臂梁,在梁的上、下表面对称地粘贴一对经过预拉伸的SMA丝<sup>[13]</sup>。试验表明,激励形状记忆合金丝后,梁的内应力改变,也改变了构件的固有频率,利用它可抑制振动,大幅度降低自由端的振幅和梁根部的应变。

目前研究最多的是采用压电元件对结构振动进行主动控制。其方法是将压电传感器和驱动器都埋入构件中,当构件振动使压电传感器两端产生电流,将电流放大、移相并送给特定位置的驱动器,通过力和电能量的转换完成阻尼作用,主动控制梁的振动、圆轴的扭振和圆筒的噪声和振动。美国NASA在直径为1.68 m,长度为3.66 m的铝圆筒四周安排5—9个PZT压电陶瓷驱动器,根据传感器得到的振动信号,合理地控制各个压电陶瓷的驱动器激振力,不同的驱动方式得到不同的降噪作用。空间站中的一些机械手在地面是组装在一个容器内的,在空中则展开成悬臂的各种桁架机械手,以适应不同用途。由于空间重力很小,阻尼也低,一旦发生振动必须采用主动控制才能消除。在桁架杆件上安装光纤传感器,以感受振动信号,然后激励压电驱动器可进行振动的主动控制<sup>[14]</sup>。

## 6 几种智能表层结构

### 6.1 表层形状可变的智能结构

目前研究的对象主要是飞机和军舰。现代飞机是依靠舵面增大升力,阻力也就相应增大。但如采用改变机翼曲度来增大升力,则可不增大阻力。美国麻省理工学院航空航天系空间工程研究中心研究了在机翼蒙皮内层安装形状记忆合金和压电驱动件,使机翼产生弯曲驱动和扭曲驱动,前者改变翼型,后者改变攻角。得到的结论是:(1)改变翼型的弯曲驱动自适应机翼比采用舵面机翼的升力系数大;(2)扭曲驱动比舵面结构的侧滚效率高;(3)驱动件应变越大,好处就越多。美国空军和美国航空航天局联合主持在AFT1/F111可变翼型试验机上进行的飞行试验表明:自适应改变翼型的无舵面飞机,是很有价值的发展方向。

军舰上使用智能表层的目的之一是减少阻力,提高军舰航速。其方法是在军舰外壳处理入驱动件,使其成为可变形表皮,它能产生微小的扰动,改变军舰外壳承受的压力,从而改变船壳体与水接触部分形状,达到减少阻力作用。这种结构是仿海豚的表皮动作。

### 6.2 光电隐身智能复合材料结构

作战飞机的红外和激光隐身是当前军事上很重要的问题。光纤智能复合材料表层结构的出现,使得光电隐身方法成为可能。这种结构材料由通光光纤与复合材料融合而成,光纤端面位于材料表面。光纤中的一部分为发送光纤,另一部分为接收光纤。发送光纤按光纤数值孔径发射出不在红外大气窗口的光波长光,在远离材料表面形成一道光墙。目前红外探测器只能在大气红外窗口范围内才进行探测,而光墙在红外窗口以外,使红外探测器无法探测到飞行器,达到红外全隐身的功用。接收光纤主要是用来接收制导激光信号,便于及时采取干扰措施。

### 6.3 飞机上的智能天线

采用微波带贴片等方案,将天线阵列埋设在飞机表层处,因其很薄,不影响飞机外形。同时采用人工神经网络系统,改变周围的电磁场,使天线具有宽频带,能适用于电子战、通信、雷达的多重交叉频带的天线。

## 7 其它方面的应用

智能结构的使用面涉及到各个行业,如智能网球拍,可以将部分网球拍的丝用 SMA 丝做成,应用控制开关控制激励 SMA 丝,这样的网球拍具有不同的柔性,击出的球具有不同的力度,使对方无法估计球的落点和力度;在医学上可以利用 SMA 丝治疗肺血栓和连接断骨,矫正骨骼畸形等;在土木建筑方面已解决了光导纤维埋入钢筋混凝土结构的技术问题,并利用它进行长时间的强度监测和办公自动化的通讯和控制系統。

## 参 考 文 献

- [1] Craig A R. Intelligent Material Systems——The Dawn of a New Materials Age. *Journal of Intelligent Material Systems & Structure*, January, 1993, 4.
- [2] [日] 舰保熙康编, 千东范译. 形状记忆合金. 机械工业出版社, 1992.
- [3] Newnham R E, Gregory R R. Electromechanical Properties of Smart Materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, July, 1993, 4.
- [4] Shin Morishita. ER Fluid Applications to Vibration Control. Devices and an Adaptive Neural——Net Controller. *Journal of Intelligent Material Systems*, July, 1993, 4.
- [5] 梁大开, 陶宝祺, 李长春. 埋入式光纤应变传感器. *南航学报*, 1994, 26 (6).
- [6] Tao Baoqi, Tao Yungang, Liang Dakai, *et al.* Smart Composite Structure of Self-Adaptive Strength. ICAS (1994年9月23日)
- [7] 胡明敏, 陈杰, 陶宝祺. 疲劳寿命计性能研究. *航空学报*, 1994, 15 (3).
- [8] Sengeckyg G P, Paul C A. Some Smart Structures Concepts. *Fiber Optic Structure and Skin*, SPIE, 1989, 1170: 2—10.
- [9] 陶宝祺, 梁大开, 王征等. 智能复合材料在未来飞机上的应用. *航空学报*, 1992, 13 (12).
- [10] Hickman C A, Gerardi J J, Feng Y. Application of Smart Structures to Aircraft Health Monitoring Innovative Dynamics, Cornell Research Park Langmuir Laboratory, Ithaca, Nr 14850—1296, U. S. A.
- [11] Grossman B, Caimi F, Alavie T. Smart Structures and Fiber Optic Sensor Research at Florida Institute of Technology—1990. *Fiber Optic Structures and Skin*, SPIE, 1990, 1370: 69—83.
- [12] 陶宝祺, 梁大开, 陶云刚等. 强度自适应智能复合材料结构. *航空学报*, 1994, 15 (3).
- [13] 王征, 陶宝祺, 梁大开. 用形状记忆合金的强度自适应智能复合材料初探. *实验力学*, 1994, 9 (4).
- [14] Venneri S L, Wada B K. Overview of NASA's Adaptive Structures Program. IAF (1993年1月5日) 243页.
- [15] Thursby M Y, Grossman B. Neural control of smart electro-magnetic structures. *Fiber Optic Structures and Skin*, SPIE, 1991, 1588: 218—229.

## CONCEPTS AND APPLICATIONS OF SMART MATERIAL STRUCTURE

Tao Baoqi Xiong Ke

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** Smart Material Structure (SMS) is a research focus in the world. Its growth and develop-

ment would pound the material industry, cause a great change in the field of structure design and affect deeply human civilization. This paper analyses the concepts and definitions of SMS, introduces the actuators, sensors and control systems, and discusses the applications and future of SMS in the following fields: self-diagnostic and self-adaptive strength systems, material fatigue life predicting system, vibration and noise reduction systems, optic-electric stealth technology and medical treatment.

**Key words** Intelligent material structure, Embedded actuators, Embedded sensors, Self-diagnostic strength, Self-adaptive strength

· 信息 ·

## 美国国家科学基金会公布 8 个战略性领域

在 1995 年美国国家科学基金会 (NSF)《项目撮》中列出了研究和教育 8 个战略 (优先) 领域, 即:

- |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| (1) 高性能计算和通讯 (HPCC)      | (5) 民用基础设施系统 (CIS)       |
| (2) 先进制造技术 (AMT)         | (6) 环境的研究 (ER)           |
| (3) 先进材料及工艺 (AMP)        | (7) 美国全球变化研究 (U. S. GCR) |
| (4) 生物技术 (Biotechnology) | (8) 科学、教学、工程和技术的教育       |

以上战略领域是由美国总统科学技术顾问委员会组织研究、NSF 制定计划布置, 并根据对美国整体利益的考虑而进行选择。值得注意的是上述 8 个领域中有 6 个为工程领域, 反映了美国及 NSF 对工程科学的充分重视。

美国 NSF 在战略领域研究中, 在处理好与其它政府部门和学术界之间伙伴关系的基础上, 发挥 NSF 的独特作用。NSF 在上述领域的总体目标是:

- (1) 加强知识基础
- (2) 改进未来科学、工程和民众的教育及培训
- (3) 鼓励知识从学术界向企业界的转化
- (4) 给国家带来用多学科解决复杂问题的希望
- (5) 加强研究和教育的基础结构

在 8 个战略领域的具体阐述中, 强调科技战略要围绕国家的整个利益; 确立美国在科学技术领域的全球领导地位; 在高性能计算和通讯领域中强调技术的应用和推广; 提出发展先进制造技术是为增强美国制造业的竞争能力。在 NSF 组织机构中又增设了工业创新 (Industrial Innovation)、小型企业创新研究 (Small Business Innovation Research) 和工业与大学合作计划 (Industry/University Liaison Program) 项目处, 体现出 NSF 在设计制造方面强调基础研究的应用前景, 强调研究成果的应用推广, 强调大学与工业的合作研究, 充分体现出 NSF 资助政策的调整是围绕经济和国家整体利益这一轴心。

(材料与工程科学部 雷源忠供稿)