

# 智能复合材料的研究进展

许美萱 刘文广 薛普兴 姚康德

(天津大学材料研究中心, 天津 300072)

**[摘要]** 综述了形状记忆合金, 压电材料、碳纤维及石墨用于设计智能复合材料的研究进展。

**[关键词]** 形状记忆合金, 压电材料, 碳纤维智能复合材料

## 1 引言

材料具有智能的关键是其对环境能动的“反应能力”。为此, 要将复杂的反应引进现有的材料与结构中, 以使其具有传感、处理和执行的功能。从材料的损伤监测及控制角度出发, 可赋予构成材料自身的要素以特殊的功能, 即通过对原子、分子或其集合体进行巧妙的组合, 使材料具有自诊断、自修复能力, 此为原子范围的设计方法<sup>[1]</sup>。另一种方法是从宏观上将传感器及执行元件埋入材料中, 构筑成智能复合材料。对于前一种方法, 目前尚难以实现, 而后一种方法则利用现有的技术, 对现存的材料进行有目的的复合, 即可开发出一种智能复合材料。

智能复合材料不仅能感觉它们周围的环境, 鉴定重要的刺激因素并对其作出反应, 而且兼有传感器、信息处理和执行系统功能<sup>[2]</sup>。把这一概念应用于材料设计中, 使材料不仅具有损伤自诊断性, 且具有能动的自修复性。鉴于此, 世界各国纷纷对智能复合材料新技术进行研制与开发, 而把其应用于大型器件如飞机, 宇宙飞船等则更引起了人们极大的兴趣。

本文介绍当今世界智能复合材料研究的最新动向。

## 2 形状记忆合金 (SMA) 与复合材料

形状记忆合金发生可逆的相转变时, 其本身的刚性、电阻、内摩擦、声波发生数等均发生变化<sup>[3]</sup>。古屋泰文认为, 这些物理性质的变化可作为检测损伤的丰富信息源。同时, 由于形状记忆合金在加温时收缩和在外力场下相态的变化, 从而产生大的形变和应力, 使材料得到自强化。尤其是马氏体细小的结晶组织结构的相互干涉可减弱材料的振动。利用这些特性可开发智能执行元件, 使材料不仅具有自诊断性、且具有损伤自愈合能力。

C. A. Rogess 等利用形状记忆合金作为具有减振, 噪声吸收功能的高阻尼材料。将 TiNi 形状记忆纤维增强环氧树脂组成混杂复合材料, 且以不同方式组合, 纤维通电加热, 相变使刚性变化, 研究其对 20—150 Hz 范围音响吸收能的情况。实验中发现, 不同组合方式能调整不同频率范围的吸收能。古屋泰文<sup>[4]</sup>将 1% 的 TiNi 合金纤维铺设于环氧树脂基体中, 制成了

---

本文于 1995 年 10 月 24 日收到。

形状记忆复合材料 (SMC)。在外力作用下, SMC 产生裂纹, 借助形状记忆合金的电阻、应力波的变化可自诊断材料的损伤。同时由于 SMA 直接通电加热产生形状记忆收缩力, 减小应力集中, 降低裂纹的传播速度, 使裂纹回缩, 从而使 SMC 得到自愈合, 而且复合材料的刚性也因 SMA 在加热时向奥氏体转化而增大。

### 3 压电材料与智能复合材料

对材料加力可产生电压 (压电效应), 反之, 若对其施加电压则产生应变或应力 (反压电效应), 具有以上性能的材料即为压电材料。利用压电材料的电能和机械能的变换, 可作为传感器或执行元件。Charon 等在纤维增强塑料 (FRP) 表面粘上一层聚偏二氟乙烯 (PVDF) 压电薄膜, PVDF 可将形变转变成电压, 以控制振动。

对于在孤立的极限条件下使用的航天飞机和人造卫星等大型复合材料构件, 常规的无损检测难以直接进行实时监测, 因微小龟裂的累积而造成灾难性事故时有发生。由江草茂则<sup>[5]</sup>研究的压电薄膜引起了人们极大的关注。这种压电薄膜是以锆钛酸铅 (PZT) 颜料和双酚 A 型环氧树脂配成涂料涂于复合材料表层固化而成。研究结果表明, 将含 53 vol% PZT 的涂料涂于宽 30 mm, 长 500 mm 厚 3 mm 的铝制悬臂梁表面制成的压电薄膜的压电常数达 9.0 (mc/m<sup>2</sup>) (m/m)。所以, 把它作为大型复合材料一体化的振动传感器是很有前途的。

### 4 碳纤维与智能复合材料<sup>[6]</sup>

碳纤维增强塑料基复合材料 (CFRP) 在一定载荷下, 其电阻增大, 通过测量电阻的变化可检测 CFRP 的损伤情况, 并预测致命破坏。最早提出此观点的是 K. Schulte<sup>[7]</sup>。我们<sup>[8]</sup>进一步研究了混杂碳纤维、玻璃纤维增强不饱和聚酯/聚氨酯 (TUPR/PU-IPN) 复合材料的损伤自诊断性。在周期性拉伸应力下, 电阻随应变呈线性变化, 当载荷增大到一定程度, 电阻呈非线性变化, 材料接近破坏时, 电阻急剧上升。每次卸载后, 形变可恢复至初始值, 但电阻出现滞后现象。假设每单根碳纤维电阻为  $R_f$ , 且平行排列,  $\Delta R$ ,  $R_0$  分别为电阻的变化及初始值;  $\eta$ ,  $\eta_f$  分别为碳纤维根数的总和及断裂的碳纤维数;  $\epsilon$  为碳纤维的形变, 可推得电阻变化率:

$$\Delta R/R_0 = \eta\epsilon / (\eta - \eta_f) + \eta_f / (\eta - \eta_f)$$

由此可见, 电阻的变化来源于  $\epsilon$  和  $\eta_f$ 。在低应力下纤维未发生断裂时,  $\eta_f = 0$ , 电阻与应变呈线性关系, 由于碳纤维伸长率较低, 故此时  $\Delta R/R_0$  较小。当应力增大使碳纤维断裂时, 上式存在两个变量, 这使  $\Delta R/R_0$  随  $\epsilon$  呈非线性变化。显然, 较大的电阻变化主要由断裂的纤维数所致。

实验中观察到, 碳纤维的电阻在固定载荷下随加载时间的延长而逐渐增大, 同时试样的应变随时间的增加而变大, 即出现蠕变现象。我们认为, 碳纤维电阻的时间依赖性主要是由于高分子基材在固定应力下发生蠕变, 此应变传递到碳纤维上, 致使其亦发生微小变形, 故电阻发生变化。当施加较大应力, 同样可观察到电阻呈非线性变化, 在断裂发生前, 电阻随增。

电阻测量法有别于光纤传感器。光导纤维埋入复合材料内部易引起材料的劣化, 而碳纤维本身作为复合材料的有机组成部分, 既承受载荷, 又起到传感器作用, 可望成为具有损伤

自诊断性的智能复合材料<sup>[8]</sup>。

## 5 石墨与智能复合材料

对于石墨增强聚合物复合材料的力学性能,已有大量文献报道,但是石墨作为一种导电粒子,在受力条件下其电阻的变化情况少有研究报道。目前,我们正在研究不同体积含量的石墨增强不饱和聚酯/聚氨酯复合材料在反复加载卸载条件下电阻变化行为。研究发现,电阻在试件破坏前急剧变大,且每一次卸载同样观察到残余电阻。通过电阻的测量可以诊断石墨增强复合材料的损伤程度,因而可望开发一种新型智能复合材料。

## 6 结束语

将现有的传感器和执行元件植入材料内部,形成智能复合材料,是使材料智能化的一种有效途径。目前首要解决的问题是使传感器和执行元件等多样化,提高灵敏度,并使其与结构材料一体化,达到真正的融合。可以预料,随着技术的发展,在不远的将来智能复合材料必将渗透到航空航天、建筑业、汽车制造业以及其他民用品制造业的广泛领域之中。

### 参 考 文 献

- [1] 江川幸一. 强化塑料, 1994, **40** (5): 185.
- [2] 姚康德, 许美萱等. 智能材料, 天津: 天津大学出版社, 1994.
- [3] 古屋泰文. 机械の研究. 1992, **44** (9): 999.
- [4] 古屋泰文. 非破坏检查. 1993, **43** (3): 157.
- [5] 江草茂则等. 智能材料. 1992, **2** (3), 22.
- [6] 柳田博明, 中什照幸等. 日本复合材料协会志. 1992, **18** (4): 149.
- [7] Schulte K. *Composites Sci and Technology*. 1989, **36**: 63.
- [8] Xu Meixuan, Liu Wenguang, Fang Lupeng, Yao Kangde. *J. Appl. Polym. Sci.* (in Press).

## PROGRESS OF INTELLIGENT COMPOSITE MATERIAL

Xu Meixuan Liu Wenguang Xue Puxing Yao Kangde

*(The Research Ceter of Materials, Tianjin University, Tianjin 300072)*

**Abstract** Research progress in design of intelligent composite materials with shape memory alloy (SMA), piezoelectric materials, carbon fiber and graphite is reviewed in this article.

**Key words** shape memory alloy, piezoelectric material, carbon fiber, intelligent composite materials