



文章编号:1006-7329(2001)01-0108-06

智能材料结构系统在土木工程中的应用^{*}

曹照平¹, 王社良²

(西北建筑工程学院 管理工程系,西安 710061; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院,西安 710055)

摘要:主要论述了形状记忆合金、压电和光纤等几种智能材料结构系统的基本工作原理和力学特性,简要介绍了它们在土木工程结构中的一些应用及相关研究,同时还提出了在研究与应用过程中存在的一些问题,展望了今后的发展前景并提出了一些建议性意见。

关键词:智能材料结构系统; 土木工程; 应用研究

中图分类号:TU506

文献标识码:A

概述

智能材料结构系统在土木工程等许多领域都有着巨大的应用潜力。就土木工程而言,智能材料结构系统及应用技术的兴起与发展不仅意味着结构功能的增强,结构使用效率的提高和结构设计形式的优化,更重要的是对传统土木工程的结构设计、建造、维护及使用控制等许多观念的更新。目前在土木工程领域内,智能材料结构系统的研究主要在以下三方面的应用研究最受重视:1)结构健康的实时检测与监控。这主要是指将先进的传感元件和驱动元件集成在传统的土木结构中,利用它们构成的网络对结构的裂缝、损伤、疲劳、冲击、缺陷、腐蚀等状态进行实时监测和控制,以确保重大土木工程结构和基础设施的安全可靠,降低其维修费用。2)形状自适应材料与结构。智能材料结构系统的研究与出现不仅可使土木工程设计人员所期盼的自适应结构的诞生成为可能,而且更重要的是它代表着先进的新型材料与传统的土木工程设计人员所期盼的自适应结构的诞生成为可能,而且更重要的是它代表着先进的新型材料与传统的土木工程结构相结合这一重大的学科研究发展方向。自适应结构既具有承受荷载和传递运动的能力,同时还兼有检测(应力、应变、裂缝、损伤、温度等)、动作(改变结构内部应力应变分布和结构外形及位置等)和改变结构特性(结构阻尼、固有频率、光学特性、周围电磁场分布)等诸多智能功能,因此其应用前景非常广阔。3)结构减振抗震抗风降噪的自适应控制。结构的动力响应一直是土木工程设计中的一个非常重要的问题,特别是对于高层建筑和桥梁等大型土木工程结构的抗震抗风问题更是如此,而智能材料结构系统的开发与应用就可为之提供一个更为有效的新途径,从而使结构的自适应控制成为可能。上述应用研究皆涉及智能材料结构系统的下述技术领域:①智能材料结构系统的集成技术;②传感器和驱动器的制备与应用技术;③信号信息的处理与传输技术;④人工智能与自控制技术;⑤现有智能材料的改性研究及新型智能材料的超前研究等。本文主要从形状记忆合金(SMA)、压电、光纤等几种智能材料的力学特性及其基本原理出发,介绍了它们在土木工程结构中的一些应用及相关研究,提出了在研究与应

* 收稿日期:2000-03-13

基金项目:国家自然科学基金(59878044)

作者简介:曹照平(1963-),男,陕西凤翔人,讲师,主要从事建筑结构抗震和智能材料结构系统在土木工程中的应用等方面的研究。

用中存在的一些问题并对其发展前景作了展望。

1 智能材料的类型及其特性

智能材料系统根据其功能特点可划分为两大类:一类是对外界或内部的刺激强度,如应力、应变及物理、化学、光、热、电、磁、辐射等作用具有感知功能的材料,通称为感知材料。这类材料主要有光导纤维、压电陶瓷、压电高分子材料、形状记忆合金及其它各种类型的传感材料,其中尤以光导纤维最为重要。表1是几种传感材料的基本性能,在实际工程中可根据需要选用它们制作各种实用的传感器。另一类是能对外界环境条件或内部状态发生变化时作出响应或驱动的材料,如形状记忆合金、压电材料、电致伸缩材料、磁致伸缩材料、电流变体、磁流变体和功能凝胶等。这些材料可根据温度、电场或磁场的变化而自动改变其形状、尺寸、刚度、振动频率、阻尼、内耗及其它一些机械特性,因而可根据不同需要选择其中的某些材料制作各种执行或驱动元件。几种比较成熟的驱动材料的基本性能见表2。此外,兼具感知和驱动功能的材料称为机敏材料,人们熟知的变色镜片就是一种能自行调节透光性能、自动屏蔽强光作用的机敏材料。机敏材料自身不具备信息处理和反馈机制,不具备顺应环境的自适应性能。而智能材料结构系统则具备传感、控制和驱动三个基本要素,能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,从而实现结构的自检测、自诊断、自监控、自校正、自修复和自适应等多种功能。通常,一种单一的功能材料要具备上述多种功能特性是很困难的,这就需要由多种材料组元复合或组装而构成一个新的智能材料结构系统^[1]。

表1 应变传感材料的基本性能

特 点	光导纤维	形状记忆合金	压电陶瓷	压电薄膜
成 本	中 等	低	中等	低
技术成熟性	良好	良好	良好	良好
可否成网	是	是	是	是
嵌入性	优良	优良	优良	良好
线性度	良好	良好	良好	良好
响应频率(Hz)	1~10 000	0~10 000	0~20 000	1~50 000
敏感频率(微应变)	0.11	0.1~1.0	0.001~0.01	2
最大微应变	200	—	5 000	200

表2 几种常见驱动材料的基本性能

特 点	电致和磁致伸缩材料	电流变体和磁流变体	形状记忆合金	压电陶瓷
成 本	中等	中等	低	中等
技术成熟性	较好	较好	良好	中等
可否成网	是	是	是	是
嵌入性	良好	较好	很好	很好
线性度	较好	较好	良好	良好
响应频率(Hz)	1~20 000	1~2 000	0~10	1~20 000
最大驱动应变	1 000~2 000	—	20 000	1 000

近年来,国内外研究成功并已经商品化的功能性材料很多,但能用于智能材料结构系统的主要有上述几种,其中形状记忆合金是利用应力和温度诱发相变的机理来实现材料具有特殊的形状记忆效应,滞后特性,阻尼特性和相变伪弹性性能等诸多功能特性的一种合金^[3],研究与开发均较成熟,因此已被广泛地应用于当前迅速发展的智能材料结构系统中。智能结构具有高度的自适应能力,它可以自动适应结构的一些特殊要求,从而可解决许多实际工程中用传统方法难以解决的工程

问题。例如将形状记忆合金处理后复合于传统的普通材料之中或加工成智能元件安装在结构的某些部位,就可利用其特殊的物理和力学性能,使之成为具有裂缝和损伤监控、被动或主动控制结构变形、振动等功能的复合材料或控制装置,以改变或调整结构的静动力特性。它构思巧妙,工艺简单,若大力开发应用必将会产生巨大的经济效益和社会效益。目前,我国已能生产多种形状记忆合金,如 Ni-Ti、Cu-Zn-Al、Cu-Ni-Al 等有色金属合金,还有 Fe-Pt、Fe-Ni-C 和 Fe-Ni-Co-Ti 等铁基合金,其中铁基合金价格较低,若进一步研究开发也可完全达到工程应用的水平。

压电材料也是一种非常重要的功能性材料,它的研制已有 100 多年的历史。1880 年,居里兄弟发现在石英晶体的特定方向上施加压力或拉力会使晶体表面出现电荷,并且电荷的密度与施加外力的大小成比例,这就是压电体的正压电效应。接着,他们又证实了逆压电效应的存在^[3]。从晶体物理学来看,压电效应是由于晶体结构上不存在地称中心造成的。当无外力作用时,晶体中的正负电荷中心重合,晶体对外不呈现极化。但当外力作用后,正负电荷中心就不再重合,晶体便呈现极化现象,于是就产生了所谓的压电效应。另一种情况是晶体中的正负电中心原来就不重合,即自发极化,这时若作用外力,极化就会发生变化而产生压电效应,这种晶体被称为热释电体。当自发极化强度方向能被外加电场重新定向时,就是所谓的铁电体。进一步的研究还表明,内部结构具有非中心对称的 20 种异极对称型点群晶体,只要是绝缘体就是压电体。其中具有单一极轴的 10 种点群的压电晶体存在自发极化,有热释电效应。在这 10 种点群的热释电晶体中,又有一部分晶体为铁电体。

一个多世纪以来,压电材料的制备与应用技术已得到了长足的发展。从最早的石英晶体和罗息盐(酒石酸钾钠 $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$)到钡钛矿型(BaTiO_3)的带氧八面体型压电晶体等,发展到今天的固溶压电材料(锆钛酸铅 PZT)和聚氟乙烯(PVDF, PVF_2),压电材料的性能越来越优越,并且已经被广泛地应用于许多工程领域。同时,人们对压电材料力学和电磁学等性能的理解也更加透彻,许多研究人员也为之进行了大量的研究工作且已经取得了不少创造性的研究成果。近年来,由于智能结构概念的出现和应用,人们对压电材料性能的研究就更加深入和系统。从表 1 和表 2 可以看出,压电材料的正负压电效应均较高,频响范围也较宽,而且还具有电致伸缩效应,这就使得压电材料在用于智能结构系统时,既可作为传感元件,又可作为驱动元件。如果能把它们的功能有效地组合起来就可构成智能材料结构系统,这对结构的振动控制非常有效,几乎可以根据设计者的要求调整结构的阻尼和振动频率等动力特性,同时也可进行结构的位移、应变、应力、加速度和破坏状况的自动监测。另一方面,压电材料的压电效应还具有较好的线性关系,并且其输入输出的信号均为电信号,易于量测和控制,而压电材料的制备技术也日趋完善和成熟。因此,目前智能结构系统的研究大多集中于将压电材料制成的感知元件和驱动元件集成于母体结构中的压电类智能结构领域。

光纤作为一种新型的传感材料,其优越的信息传输性能是其它任何材料都无法比拟的。它具有体积小、重量轻、反应灵敏、抗电磁干扰能力强、耗能小、造价低廉、便于实现分布式或准分布式检测等特点。因此可被广泛地应用于智能材料结构系统中的“神经元”或机敏结构中的应力、位移及裂缝监测。其基本原理是通过分析光的传输特性,如光强、相位和波长等,就可获得光纤周围材料的应力、压强、电磁场、密度、温度、化学成分、X 射线和 γ 射线等因素的变化,从而为人工智能和神经网络技术的研究与实现提供更为优越的条件和途径。

2 智能材料结构系统在土木工程中的应用研究

2.1 形状记忆合金在土木工程结构中的应用

作为一种新型的功能性材料,形状记忆合金有一个非常重要的特点,这就是在激发材料的形状记忆效应时,材料能产生很高的回复应力(700MPa 以上)和回复应变(8%左右),并且还具有很强的能量储存和能量传输能力。利用这一特性就可把材料埋植在各种结构中,进行结构的自增强、自增韧、自诊断和自适应控制的研究与应用,同时也可将材料制成智能型驱动器,进行结构的裂缝、损

伤、变形及振动的主动控制等方面的研究与应用。国内外在这方面已有不少成功的研究与应用实例^[4,5]。

形状记忆合金的另一个重要特性是相变伪弹性性能和相变滞后性能,其应力—应变曲线在加卸载过程中形成环状,这说明材料在此过程中可吸收和耗散大量的能量。试验结果表明,形状记忆合金的相变回复力也很高,其值可达近 400 MPa。因此,根据这一特性就可研制具有相变伪弹性性能的形状记忆合金被动耗能器或被动耗能控制系统,以便进行土木工程结构的被动耗能抗震控制。一般地,形状记忆合金被动耗能器大都安装在结构的层间或底部,其目的是为了能够使耗能器明显地感受到结构的层间变形,从而达到消耗地震能量的目的。有关试验表明,安装了形状记忆合金耗能器的结构,60%左右的地震能量都能被耗能器吸收,结构的位移可得到明显的抑制和减小。目前,国外已将形状记忆合金耗能器用于砌体结构和钢筋混凝土结构的被动抗震控制设计,同时也有用于古建筑抗震加固的应用实例^[6],还有将形状记忆合金制成主动阻尼控制系统的研究^[7,8]。

2.2 压电材料和光导纤维在土木工程结构中的应用

将压电体集成于传统的结构中,利用压电传感元件感知结构的振动模态,并根据其输出,再通过相应的控制算法确定压电作动体的输入,以实现结构振动的主动控制,是目前压电类智能结构应用研究的前沿和热点。为此,许多研究人员先后利用锆钛酸铅 PZT 作为加速度传感器和驱动体研究了任意复杂激励下压电层合结构的主动阻尼和被动阻尼以及主动振动控制等问题,还有的学者根据经典层板理论,采用加速度反馈控制方法讨论了利用压电传感元件实现复合材料层合梁的主动阻尼控制并进行了试验研究。特别是近年来压电材料和压电堆技术的迅速发展,为压电类智能结构的研究和应用开辟了许多新领域。不少学者已将压电材料和压电堆技术应用于土木工程结构的健康监测、安全评定和自适应修复以及抗震抗风等问题的研究,其中代表性的主要有 Kamada^[9]等人的研究工作,他们已成功地吧压电堆技术用于建筑结构的主动抗震控制,并取得了很好的控制效果,造价也较低廉。此外,也有将压电材料与普通控制装置相结合的半智能型混合抗震控制及半智能型主动抗震控制等方面的研究。

光纤材料主要用于传感、监测和远距离信息传输。目前,在传统的混凝土结构中埋入光纤作为传感元件进行结构强度、裂缝、损伤、变形、振动、钢筋锈蚀和施工质量等方面的自动诊断、监测、预报、控制和评价,同时再埋入驱动元件(如形状记忆合金等),并将控制元件和信息处理系统与之结合,形成具有智能功能的混凝土结构,从而实现混凝土结构的自检测、自诊断、自适应和自修复等,也是智能材料结构系统在土木工程中的研究与开发应用的热点和前沿。国外在这方面已经有许多成功的应用实例,我国也已经将光纤传感材料用于三峡大坝和部分桥梁的健康监测和安全评定等,这些都为光纤光栅技术在土木工程结构中的进一步研究与开发应用奠定了坚实的理论基础。

3 存在的问题以及研究方向

虽然智能材料结构系统具有许多奇特的仿生物智能功能,并且在土木工程结构中的研究与应用已经展现出其独特的优越性能和广阔的应用前景,但由于这个问题是一个充满挑战的多学科交叉的前沿研究课题,因此还有许多问题有待于进一步深入研究和探讨。

1) 就形状记忆合金而言,这一功能材料的发现不仅改变了长期以来形成的金属是热胀冷缩,金属的弹性变形是线性关系等许多传统观念,虎克定律在这种材料中已不再适用,而且其独特的形状记忆效应和相变伪弹性性能等智能功能也使这一材料力学行为的描述更加困难。因此欲想研制能够应用于土木工程结构中的形状记忆合金主动或被动控制装置,就必须对这种材料的微观和宏观力学性能进行更深入的研究,建立便于工程应用的简化本构模型和力学分析方法已成为急需解决的重要问题。此外,激励形状记忆合金驱动器需要消耗能量,若直接利用材料本身的电阻以通电

的方式使其加热而产生驱动力,则由于材料本身的电阻不大,激励驱动器就需要较大的电流和较粗的导线,这将限制材料在某些情况下的应用,驱动器的响应频率也是一个值得研究的问题。为此,现有形状记忆合金基本性能和材料改性的研究以及更能适合土木工程结构应用的新型形状记忆合金材料的超前研究也将具有重大的现实意义。

2) 根据形状记忆合金的相变伪弹性性能和高阻尼特性研制而成的被动抗震控制装置已经经历了试验和实际工程的检验,而且表现出显著的减震和耗能效果,因此新型形状记忆合金主被动抗震控制装置的研制与开发是现实可行的,并且也可以完全达到形状记忆合金控制器制作的标准化。但是,如何研制具有低能耗、大出力、多功能的形状记忆合金控制器及其在实际工程中的设计方法,现有资料所见甚少,有关形状记忆合金控制器的可靠性与耐久性等方面的研究也有待于进一步加强。

3) 压电材料是目前智能结构系统研究中应用得最多的一种传感材料和驱动材料。它不仅可单独作为结构应力、应变、位移和加速度等力学量的感测元件,而且还可与压电驱动器并联起来形成各种有源和无源网络,非常方便和灵活地自动控制结构的阻尼和振幅。但压电材料存在的主要问题是驱动力较小,虽然国外已用压电堆技术来弥补这一缺点,但对于大型土木工程结构来说,其直接应用尚存在不少问题,如理论分析比较复杂,结构与控制系统的集成技术较难实现,经济高效的压电驱动器的制备技术与设计方法比较困难等。

4) 光纤材料将成为现代土木工程结构安全监测和状态控制的首选传感材料。在土木工程结构中埋入光纤传感器或把光纤传感器粘贴在结构的表面,从而使其能够感受到外部荷载的作用并能量测结构对外部荷载的反应,在线、动态、实时、主动监测和控制结构的各种信息,估计结构的损伤和安全状况,是今后土木工程结构发展的另一个重要方向^[10,11]。但从目前在土木工程领域的研究与应用情况来看,尚存在基础研究薄弱,传感原理研究困难,与基体材料互适应性研究较少等问题,这些都有待于进一步深入研究和讨论。

参考文献:

- [1] Tomlinson G R, Bullough W A. Smart materials and structures. Proc. of the 4th European and 2nd MIMR Conference UK, July, 1998
- [2] 王社良, 沈亚鹏. 形状记忆合金的力学特性及其工程应用[J]. 工业建筑, 1998, 28(3): 31—35
- [3] Newnham R E, Ruschau G R. Smart electroceramics[J]. J. Am. Ceram. Soc., 1991, 74(3): 463—480
- [4] 王社良, 巨生国, 苏三庆. 形状记忆合金的动力响应特性及振动控制[J]. 西安建筑科技大学学报, 1999, 31(1): 14—17
- [5] 王社良, 薛凌云, 苏三庆. 形状记忆合金驱动器的力学性能[J]. 西安建筑科技大学学报, 1999, 31(3): 233—236
- [6] Formi M, Indirli M, Martelli A. Rehabilitation of cultural heritage damaged by the 15th October 1996 earthquake at San Martino in Rio. Reggio Emilia. Italy. Proc. International Post-SMIRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures, Taormina, Italy. August 25—27, 1997
- [7] 王社良. 形状记忆合金拉索控制结构地震响应分析[C]. 国家自然科学基金委员会、智能材料结构系统在土木工程中的应用研讨会, 武汉, 1999, 6
- [8] 王社良, 苏三庆. 形状记忆合金的超弹性恢复力模型及其结构抗震控制[J]. 工业建筑, 1999, 29(3): 49—52
- [9] Kamada T. Active control of structures with smart structures using PZ actuators[J]. J. Inrell. Mater. Syst. and struc., 1997, 8(6): 447—456
- [10] Rolf B, Philipp M, Urs S. Application and reliability of a fiber optical surveillance system for a stay cable bridge

- [10] J]. *Smart materials & structures*, 1998, 7(2): 217-228
- [11] Wolff R, et al. Monitoring of prestressed concrete structure with optical fiber sensors[J]. *SPIE*, 1993, 1919(1): 23-29

Study on Application of Intelligent Material Systems and Structures to Civil Engineering

CAO Zhao-ping

(Northwestern Institute of Architectural Engineering, Xi'an 710061, China)

Abstract: The fundamental principle and mechanical behavior of several intelligent material systems, such as shape memory alloy, piezoelectricity and fiber optic sensor etc. are discussed in this paper. Some application to civil engineering structures and related research are introduced briefly. The existing problems in the application and research are also presented at the same time. The future development of the intelligent material systems and structures are prospected and some proposals are put forward.

Keywords: intelligent material systems and structures; civil engineering; research and applications