

国家十五重点图书

智能复合材料结构体系

李卓球 宋显辉 等著

武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press

TB381

3

国家“十五”重点图书

智能复合材料结构体系

李卓球 宋显辉 等著

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

图书在版编目(CIP)数据

智能复合材料结构体系/李卓球,宋显辉等著. —武汉:武汉理工大学出版社,2005.6

ISBN 7-5629-2362-0

I. 智 …

II. ①李…②宋…

III. 智能材料:复合材料—研究

IV. TB381

出版发行:武汉理工大学出版社

武汉市武昌珞狮路122号 邮编:430070

<http://www.techbook.com.cn>

E-mail: yangxuezh@mail.whut.edu.cn

印刷者:武汉理工大印刷厂

经销者:各地新华书店

开本:880×1230 1/32

印张:8.75

字数:240千字

版次:2005年6月第1版

印次:2005年6月第1次印刷

印数:1—3000册

定价:25.0元

内容简介

本书在简要介绍智能复合材料结构系统的研究现状与进展的基础上,重点阐述了作者及其课题组在水泥基智能复合材料方面的研究成果。其内容包括:水泥基智能复合材料的组成及压敏性、温敏性、热电效应、力电效应、电热效应、损伤图像检测等的机理和实验结果;水泥基智能复合材料结构系统的自诊断与自调节的理论分析、数值模拟和实验研究模型;在道路融雪化冰、混凝土钢筋锈蚀监测、混凝土结构变形检测、结构温度变形自适应调节以及混凝土结构可视化健康检测的阶段性研究成果;并指出了水泥基智能复合材料在工程应用中仍存在的一些问题。

本书可供土木工程、力学、物理、材料等学科的相关研究人员、高校师生参考。

前 言

智能材料结构系统是 20 世纪末材料科学与工程领域发展的一项重要突破,它标志着材料与结构设计的多功能化、信息化和智能化时代的到来。

光纤光栅、形状记忆合金、压电材料等智能材料,有的是以器件形式存在,有的是以复合材料的结构形态存在。本书的立意在于讨论后一种形态的智能材料,即智能复合材料。到目前为止,已出现了光纤智能复合材料、记忆合金智能复合材料、压电智能复合材料、水泥基智能复合材料等。即便如此,面对智能复合材料这样一个重大的研究课题,其领域之广泛、内涵之深厚,不是作者能够涉足完成的。因此,本书仅以水泥基智能复合材料的相关内容作为讨论重点,而将应用领域不断扩展的、非常重要的其他智能复合材料以极少数的篇幅做了十分简略的介绍。其原因是:一方面由于作者水平与研究领域十分有限;另一方面,也是因为作者 10 余年来主要致力于水泥基智能复合材料的研究。

本书所介绍的水泥基智能复合材料相关内容,大部分是作者及其课题组的研究成果。该研究成果来源于两项国家自然科学基金重点项目资助:第一项是 1995 年启动的“无机非金属智能复合材料的组成、性能与结构”项目;第二项是 2003 年启动的“机敏混凝土及其结构”项目。前一个项目重点研究水泥基智能复合材料的材料制备与性能;后一个项目重点研究水泥基智能复合材料的结构体系。

水泥基智能复合材料不仅是一种复合材料,更是一种重要的智能材料。它具有感知应力、应变、损伤、温度以及电场的功能;具有调节温度与变形,愈合损伤等特性;与智能系统相结合,可实现智能混凝土结构的自诊断、自调节、自愈合。

从另一个层面来讲,水泥基智能复合材料不仅是一种多功能材

料,而且是一种与混凝土力学性能十分接近的结构材料。这种特殊的功能结构一体化材料,在应用于混凝土结构时具有本征性,因此又称其为本征智能复合材料。

进入 21 世纪,人类对于重大工程的长期安全检测与监控提出了更高的要求,没有长期安全检测与监控的重大工程是人类所不能接受的工程。混凝土是土木工程中应用最广泛的结构材料之一,混凝土结构除受到外界载荷影响外,还面临着钢筋锈蚀、冻害、环境侵蚀等三大问题;载荷的疲劳效应、环境腐蚀和材料老化等灾变因素的耦合作用将不可避免地导致结构的损伤积累和抗力衰减,甚至引发灾难性的突发事故。因此,水泥基智能复合材料的多功能性、结构性能的相容性,展示了它在混凝土结构工程中潜在的、广泛的应用前景。

尽管水泥基智能复合材料具有众多的功能特性,但仍存在许多基础性的科学问题有待进一步探索,在工程应用中仍存在许多的关键技术问题有待进一步解决。因此,本书对于水泥基智能复合材料结构体系的介绍与讨论,仅作为一种学术上的探索与参考,并恳望得到同仁的批评指正。

本书是在课题组成员的通力合作下撰写而成的。其中,宋显辉、孙明清、朱四荣、黄莉分别编写了第 2 章、第 3 章、第 4 章和第 5 章,研究生方玺、肖敏芳在本书第 5 章中提供了部分内容,全书的统稿工作由本人与宋显辉负责,朱四荣协助完成。

本书是国家“十五”重点图书,在撰写过程中得到了国家自然科学基金重点项目(项目编号 50238040)的资助;此外,本书引用了国内外许多学者的文献资料,在此一并表示衷心感谢。

李卓球

2005 年 4 月 6 日于武昌马房山

目 录

1 智能复合材料及其进展	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 智能材料	(1)
1.1.2 智能复合材料	(2)
1.1.3 智能结构及其系统	(4)
1.2 水泥基智能复合材料的自感知研究进展	(5)
1.2.1 压敏特性	(7)
1.2.2 温敏特性	(9)
1.2.3 热电特性	(9)
1.2.4 力电效应	(10)
1.3 水泥基智能复合材料的自调节研究进展	(11)
1.3.1 电热效应	(12)
1.3.2 电力特性	(13)
1.3.3 自减振特性	(13)
1.4 水泥基智能复合材料的自愈合研究进展	(15)
1.4.1 结晶沉淀自愈合	(15)
1.4.2 渗透结晶自愈合	(17)
1.4.3 聚合物固化仿生自愈合	(18)
1.4.4 电解沉积自愈合	(21)
1.4.5 自愈合存在的问题	(23)
1.5 形状记忆合金智能复合材料	(25)
1.5.1 在航天航空器结构中的应用实例	(26)
1.5.2 在土木工程中的应用实例	(27)
1.6 光纤智能复合材料	(29)
1.6.1 光纤光栅	(29)
1.6.2 光纤光栅传感器在航空航天业中的应用举例	(32)
1.6.3 光纤光栅传感器在船舶航运业中的应用举例	(33)

1.6.4	光纤光栅传感器在土木工程中的应用举例	(35)
1.7	压电智能复合材料	(36)
1.7.1	阻抗法及其应用	(37)
1.7.2	波动法及其应用	(39)
	参考文献	(40)
2	水泥基智能复合材料的压敏性及其智能结构	(52)
2.1	概述	(52)
2.2	水泥基智能复合材料压敏性的定义和基本现象	(54)
2.3	水泥基智能复合材料组分、结构与压敏特性	(60)
2.3.1	碳纤维的掺量和长度对压敏性的影响	(60)
2.3.2	龄期对压敏性的影响	(61)
2.3.3	碳纤维表面处理对压敏性的影响	(63)
2.3.4	外加剂对压敏性的影响	(63)
2.3.5	成型工艺对压敏性的影响	(63)
2.4	水泥基智能复合材料压敏性的不同测试方法	(65)
2.4.1	直流电阻测试法	(65)
2.4.2	交流阻抗测试法	(66)
2.4.3	电容测试法	(70)
2.5	水泥基智能复合材料的动态压敏特性	(74)
2.5.1	对三角波交变载荷的响应	(74)
2.5.2	对冲击载荷的响应	(75)
2.6	水泥基智能复合材料压敏性在混凝土结构中的应用	(76)
2.6.1	混凝土简支梁弯曲变形的自诊断	(76)
2.6.2	混凝土立柱偏心的自诊断	(79)
2.6.3	有温度梯度时梁变形检测的温度补偿	(81)
2.6.4	水泥基智能材料周边有约束的压敏性	(82)
2.6.5	利用压敏性监测混凝土中的钢筋锈蚀	(85)
2.6.6	结构平均应变和应力检测	(89)
2.7	水泥基复合材料承载时的损伤	(91)
2.7.1	水泥基材料及结构的损伤监测	(91)

2.7.2	水泥基材料局部损伤的检测	(94)
2.7.3	混凝土构件残余寿命预测	(100)
2.7.4	混凝土的冻融损伤分析	(104)
2.7.5	新旧混凝土粘结质量的评估	(107)
2.8	压敏性研究目前存在的问题	(110)
	参考文献	(111)
3	水泥基智能复合材料的温敏性、力电效应及其智能结构	(116)
3.1	概述	(116)
3.2	水泥基智能复合材料的温敏性	(117)
3.2.1	水泥基智能复合材料的温敏性及其机理	(117)
3.2.2	碳纤维掺量对水泥基智能复合材料温敏性的影响	(120)
3.3	水泥基智能复合材料温敏性在混凝土结构中应用	(121)
3.3.1	嵌入式温敏混凝土结构	(121)
3.3.2	碳纤维水泥层/普通混凝土复合温敏结构	(121)
3.4	水泥基智能复合材料的塞贝克效应	(123)
3.4.1	水泥基智能复合材料的塞贝克效应与机理	(123)
3.4.2	水泥基 PN 结的伏安特性及其塞贝克效应	(125)
3.4.3	塞贝克效应影响因素的研究	(127)
3.5	水泥基智能复合材料塞贝克效应在混凝土结构中应用	(129)
3.5.1	埋入水泥基智能复合材料的温敏混凝土柱	(129)
3.5.2	碳纤维水泥层/普通混凝土复合温敏结构	(130)
3.5.3	连续碳纤维温敏混凝土杆	(131)
3.5.4	温度自诊断自适应智能混凝土结构及模型	(132)
3.6	水泥基智能复合材料的力电效应	(133)
3.6.1	水泥基智能复合材料的力电效应	(133)
3.6.2	孔隙水与水泥基智能复合材料力电效应的关系	(134)
3.6.3	水泥基智能复合材料力电效应的机理	(136)
3.6.4	水泥基智能复合材料的电磁发射现象	(138)
3.7	水泥基智能复合材料的电力效应	(141)

3.7.1	实验方法	(141)
3.7.2	水泥基智能复合材料的电力效应	(141)
3.7.3	电力效应的机理	(142)
3.8	基于电力效应应用的机敏混凝土梁	(145)
3.8.1	试验模型与测试系统	(145)
3.8.2	试验结果	(146)
	参考文献	(147)
4	水泥基智能结构的自调节	(151)
4.1	概述	(151)
4.1.1	变形自调节	(152)
4.1.2	温度自调节	(153)
4.1.3	高阻尼抗振调节	(153)
4.2	变形自调节的基本原理及实验	(154)
4.2.1	碳纤维毡混凝土叠层梁的实验模型及材料	(154)
4.2.2	叠层梁电热变形实验装置及实验过程	(154)
4.2.3	叠层梁电热变形实验结果分析	(155)
4.3	变形自调节理论分析	(157)
4.3.1	叠层梁的热传导数学模型	(157)
4.3.2	叠层梁电热驱动的动态响应	(159)
4.3.3	叠层梁的电热变形数值模拟	(163)
4.3.4	叠层梁电热变形的实验与理论数值的比较	(169)
4.4	变形自调节中的温度、变形自检测	(171)
4.4.1	温度检测	(171)
4.4.2	温差检测	(173)
4.4.3	变形检测	(174)
4.5	变形自调节的控制理论与方法调节实验	(175)
4.5.1	被控对象的数学模型	(175)
4.5.2	变形自调节的控制方法	(176)
4.5.3	反馈信号的预处理	(177)
4.5.4	碳纤维毡水泥砂浆叠层梁变形调节实验	(177)
4.6	温度自调节原理实验	(179)

4.6.1	导电混凝土材料的选取	(179)
4.6.2	温度自调节的基本电热实验	(180)
4.7	温度自调节理论分析	(183)
4.7.1	导电混凝土板升温微分方程及其温度场	(183)
4.7.2	导电混凝土板降温微分方程及其温度场	(185)
4.7.3	导电混凝土升温降温曲线	(186)
4.8	温度自调节的数值模拟	(187)
4.8.1	有限元计算模型	(187)
4.8.2	有限元计算结果分析	(191)
4.9	水泥基复合材料融雪化冰实验	(203)
4.9.1	碳纤维混凝土除冰实验研究	(204)
4.9.2	野外融雪实验	(208)
4.10	自增强阻尼混凝土与高阻尼结构	(211)
4.10.1	聚合物对水泥砂浆阻尼性能的影响	(211)
4.10.2	硅粉的硅烷化对水泥砂浆阻尼性能的影响	(216)
	参考文献	(219)
5	水泥基智能复合材料结构损伤的成像诊断方法	(222)
5.1	概述	(222)
5.2	红外检测的方法与原理	(222)
5.3	水泥基智能复合材料红外成像诊断方法与原理	(224)
5.3.1	水泥基智能复合材料红外成像诊断方法	(224)
5.3.2	水泥基智能复合材料红外成像诊断原理	(226)
5.4	水泥基智能复合材料红外成像诊断实验	(229)
5.4.1	红外成像诊断实验	(229)
5.4.2	不同电阻值试样的成像诊断结果与分析	(231)
5.4.3	不同裂纹深度试样的成像诊断结果与分析	(235)
5.4.4	多裂纹试样的成像诊断结果与分析	(236)
5.4.5	含空鼓缺陷的试样成像诊断结果与分析	(236)
5.5	水泥基智能复合材料红外成像诊断的有限元分析	(239)
5.5.1	裂纹深度对表面温度分布的影响	(240)
5.5.2	电阻率对表面温度分布的影响	(242)

5.6	水泥基智能复合材料红外成像诊断的理论分析	(243)
5.6.1	温度场的格林函数分析方法	(243)
5.6.2	含裂纹试样的温度场求解	(245)
5.6.3	算例及分析	(248)
5.7	超声声纳成像诊断	(249)
5.7.1	混凝土超声波探伤技术	(249)
5.7.2	超声波 CT 的基本原理和反演方法	(250)
5.8	超声波 CT 成像结果与分析	(252)
5.8.1	超声波 CT 探伤技术的实施	(252)
5.8.2	试验结果及评价	(254)
5.8.3	影响成像结果的主要因素	(255)
5.8.4	基于 BP 神经网络的图像处理方法	(257)
5.8.5	目前存在的问题	(259)
	参考文献	(260)

1 智能复合材料及其进展

1.1 概 述

1.1.1 智能材料

智能材料的来源可以追溯到 20 世纪 70 年代,美国学者 Clause 等人将光纤埋入聚合物基碳纤维复合材料中,称之为自适应材料(Adaptive material),被一些学者认为是智能材料的首次实验。然而,关于智能材料概念的正式提出,则产生在 20 世纪 80 年代中期,如提出“Smart material”、“Intelligent material”等,并由此引发不少学者对智能材料的定义展开了讨论。肖纪美院士在《智能材料的来龙去脉》一文中,介绍了不同学者有关智能材料的各种定义,并通过逻辑分析,采用定义和划分的方法,对智能材料概念的内涵和外延进行了客观的评述。

师昌绪院士通俗而又深刻地指出:智能材料是机敏材料加控制功能,机敏材料就是完成感知(Sensing)和驱动(Actuating)功能的材料。杨大智院士给出了一个相对全面的定义:“智能材料是模仿生命系统,能感知环境变化,并能实时地改变自身的一种或多种性能参数,做出所期望的、能与变化后的环境相适应的复合材料或材料的复合。”这个定义不仅指出了智能材料的组成是一种结构系统,而且指出了该结构系统的“智能特性”的本质。

因此,我们通常所指的智能材料,实质上是指在智能结构系统中的功能材料或具有智能特性的功能材料。当这种材料与智能结构系统联系在一起时,它便是智能材料;当它与智能结构系统隔离开来,

则仅仅是一种功能材料。本书所涉及的智能材料,都是在与智能结构系统相联系时进行讨论的。

智能材料可分成本征型和集成型两类。当智能材料的力学性能与被应用结构材料的力学性能基本相同时,这种智能材料相对于被应用结构便可认为是一种本征型的智能材料。本书主要讨论的水泥基智能复合材料相对混凝土结构而言,便是一种本征型的智能材料。集成型智能材料是由传感器、控制器和执行器等嵌入结构中而集成的功能系统,如光纤传感器件、压电传感驱动器件等。

也有人将智能材料分为主动式智能材料和被动式智能材料。被动式智能材料能响应环境的变化,通常有自愈合或承受突然变化的待命能力。例如,钛酸钡 PTC 陶瓷在铁电相变温度附近,电阻会突然增大,造成电路断路,对电路有保护作用;当温度降低时电阻又恢复到较小的值,接通电路。主动式智能材料能感知环境的变化,利用反馈系统产生响应。如丰田汽车公司在汽车的悬架系统中采用压电传感器感知路况,并输入信号到压电驱动器系统,从而自动调整悬架以补偿不规则路况。有些智能材料具有传感器和执行器双重功能,压电陶瓷就是最典型的例子之一,作传感器时力学量转换为电学量,作执行器时电学量转换为力学量。

日本东京大学柳田博明教授提出融合结构材料和功能材料的所谓“贤材”(Ken material)。Ken 是由健、俭、圈、建、检、兼等日语的发音而来。贤材的含义可用上述六个字来概括:贤材是以大众为主体支持的健全技术(健);省去了复杂的系统(俭);不影响环境,能与环境相容(圈);适用于土木建筑等大型结构(建);本身具有感知功能(检);是结构材料又兼有功能材料特性(兼)。

1.1.2 智能复合材料

在智能材料的基础上,将机敏材料与结构材料在材料层次上进行工艺复合,研制出具有感应功能和驱动功能等的智能复合材料,是

20 世纪末材料科学与技术领域发展的一项重要突破,它标志着材料设计的多功能化和智能化时代的到来。

智能复合材料出现的历史与智能材料一样,可以追溯到上世纪 70 年代,由美国学者 Clause 等人研究的光纤聚合物基碳纤维复合材料。这种材料能感知自身的应力和损伤,具有功能与结构性能两种特性。现在看来,Clause 等人的探索可以作为早期智能复合材料研究的开端,具有开创性。

那么,智能复合材料的定义是什么呢?简单来说,智能复合材料是含有机敏材料的、由多种组分材料复合而成的先进材料,它具有与智能材料类似的智能特性。

智能复合材料的本质特性应该是智能特性,这一点与智能材料的本质是一致的。因此,智能复合材料应该归类于智能材料。

智能复合材料还具有复合材料的基本特征,即材料组成的复合性,材料性能的可设计性与先进性。这些特征表明:智能复合材料不是以单一的智能材料器件存在,或仅仅是将智能材料作为一种传感和驱动装置设置在结构材料上,而是将多种组分材料复合。

同时,它与一般复合材料也有不同:其一,组分材料中具有机敏材料;其二,材料性能的可设计性与先进性不仅表现在结构性能方面,而且还体现在具有机敏功能的特性方面。

因此,本书所讨论的智能复合材料,既可以是一种智能材料,同时也是一种复合材料,其定义范围如同图 1.1 所示。

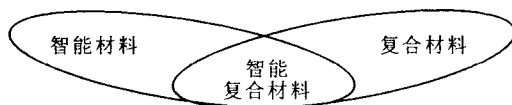


图 1.1 智能复合材料的定义范围

以形状记忆合金纤维智能复合材料为例:从材料复合而言,将形状记忆合金丝与玻璃纤维、聚合物基作为组分材料,采用聚合物复合

材料传统的方法,并考虑到形状记忆合金的记忆形变与相变温度,便可形成一种形状记忆合金智能复合材料,这种制作过程体现了复合材料的制作工艺的复合性,而且在组分材料中含有机敏材料形状记忆合金丝。

从材料性能而言,一方面,形状记忆合金丝作为增强纤维直接提高材料的表观结构性能;另一方面,利用变温方法控制形状记忆合金的相变,可改变形状记忆合金的弹性模量,由此改变整体材料的刚度继而改变其结构的自振频率,实现结构的振动控制。

作为本书的主要讨论对象——水泥基智能复合材料,从材料复合而言,将碳纤维、添加剂、水泥砂石等作为组分材料,采用改进的混凝土制作方法,并采用碳纤维的分散技术,便可形成一种水泥基智能复合材料。这种制作过程体现了复合材料的制作工艺的复合性,并含有碳纤维机敏材料的组分材料。

从材料性能而言,一方面,水泥基智能复合材料不仅具有良好的结构性能;另一方面,又具有感知应力、应变、损伤、温度以及电场,调节温度与变形,愈合损伤等的功能特性,与智能系统相结合,可实现智能混凝土结构的自诊断、自调节、自愈合。

1.1.3 智能结构及其系统

智能复合材料具备了实现智能化的材料属性,这种材料属性是由其功能特性所赋予的。正如前面所说,如果单纯从材料本身而言,它还不足以实现智能化。

智能复合材料应用的目的在于:对指定的结构进行实时监测、诊断、控制甚至自适应响应。因此,智能复合材料必须要有结构作为依托,作为应用背景。也就是说,智能复合材料必须作为结构的一部分。这种结构通常归类为智能结构。

智能复合材料与智能结构是分别在材料和结构层次的两个概念,既有联系又有区别。其最本质联系在于两者均具有实现智能化

的属性,其区别主要在于尺度的层次上。

但唯此还不能使智能复合材料及其结构实现智能化,因此,还必须有一个系统作为实现智能化的载体。这个控制系统通过相关装置,将赋予智能复合材料以“生命”,使其功能特性得到合适的发挥,并对智能复合材料及其结构响应实时地进行信息接收、处理、控制。

由上可见,智能复合材料要真正实现智能化,不仅要有结构作为依托,还需以智能系统作为载体。否则,这种智能复合材料便失去了发挥其本质的属性,充其量只能作为一种功能材料。因此,本书实际上是在智能结构系统范畴内或与智能结构系统紧密联系下,开展智能复合材料讨论的。

由前面简要叙述表明:目前已出现了多种智能复合材料,如形状记忆合金智能复合材料、光纤智能复合材料、水泥基智能复合材料等。此外,还有压电智能复合材料等。限于本书的篇幅,除了在本章仅对形状记忆合金智能复合材料、光纤智能复合材料、压电智能复合材料作简要介绍外,全书的重点放在水泥基智能复合材料及其结构系统的讨论上。在讨论过程中,我们引用了不少国内外学者的文献成果,同时,也引用了笔者及其课题组所做的研究工作。这些研究工作是笔者在 1994 年、2002 年两度获得国家自然科学基金重点项目资助下,由课题组成员共同完成的。

1.2 水泥基智能复合材料的自感知研究进展

进入 21 世纪,人类对于重大工程的长期安全的检测与监控提出了越来越高的要求,没有长期安全检测与监控的重大工程是人类所不能接受的工程。大型结构和基础设施,如桥梁、超高层建筑、大跨空间结构、大型水坝、核电站、海洋采油平台及港口设施等的损伤积累和灾变行为日趋突出(欧进萍院士,1996)。美国截至 1998 年底整个混凝土工程的价值约为 6 万亿美元,而今后每年用于检测、维修改