第 16 卷 第 1 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 1
1999 年 2 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA February 1999

SMA 智能复合材料结构研究进展

任勇生
(太原理工大学机械电子工程研究所, 太原 030024)

摘 要 扼要介绍近年来 SMA 智能复合材料结构的研究进展, 着重总结围绕该智能结构的本构模型及其在结构振动、噪声与冲击的控制、裂纹诊断与控制等方面的研究成果, 并指出目前存在的问题和今后所需研究的一些关键课题。

关键词 智能复合材料, SMA 元件, 振动、噪声与冲击控制, 裂纹监测与控制
中图分类号 TG139. 6

智能复合材料结构是一类集成有传感元、驱动元的主动材料系统, 除了具有感知、驱动功能外, 还同时具有自动控制和计算学习的功能。这种基于仿生学概念发展起来的最先进的复合材料, 能够适时地感知和调整材料的各种状态, 以适应内外环境的变化, 实现自检测、自诊断、自调节、自恢复、自我保护等多种特殊功能。

适合于作为驱动元件的智能材料包括: 电流变体, 压电材料, 形状记忆合金(SMA), 磁致伸缩体和铁电体等。适合于传感功能的智能材料包括: 压电材料(压电薄膜、压电陶瓷), 光导纤维, SMA 等。在上述智能材料中, SMA 具有一些实用性很强的特殊功能, 如形状记忆效应(SME), 超弹性功能和双程 SME。所谓 SME 是指 SMA 在低温马氏体相产生的塑性变形, 在外载荷卸除之后, 通过加热即可恢复的功能。若 SMA 受到约束, 则形状的恢复受阻, 材料内部将产生较大的回复力。

在目前已发现的实用性较强的少数几种 SMA 中, NiTi 由于它具有感应灵敏度高, 微应变大, 可回复应力大, 能量储存和传输的能力强, 致动机理简单(驱动器只需 SMA 单独一种材料设计, 可拉成丝状或纤维状)等优点, 因而有良好的感应和驱动性能, 适合于成为理想的自感执行元件(Self-sensing actuator)。

SMA 智能复合材料是将 SMA 元与基体材料通过物理或化学的复合工艺(如浇铸, 碾压, 胶合等)制备而成。其中 SMA 元件的几何形体包括薄膜, 薄板; 纤维(晶须), 丝; 颗粒。基体材料包括各种树脂或者金属和非金属材料, 也包括功能材料, 如铁电体, 铁磁体, 半导体等。还包括各种纤维增强复合材料, 如石墨/环氧层板等。常见的复合形式有: (1) 将 SMA 蒙皮、薄膜或者 SMA 丝粘贴在基体材料的表面, (2) 将 SMA 纤维或者颗粒埋入基体材料的内部, (3) SMA 丝与基体结构在某些离散点连接。

SMA 智能复合材料的应用目前已涉及到机械工程、交通能源、土木工程以及国防工业、空间站技术和航空航天工程等尖端科技领域, 甚至也开始向生物医学、仿生学、日常民用品等

收修改稿、初稿日期: 1998-06-15, 1998-01-17。国家自然科学基金和山西省自然科学基金资助项目

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

领域渗透。在工程结构的动态与静态分析方面, SMA 智能复合材料的研究主要涉及下列内容: (1) 梁、桁架、板壳类结构的变形控制, 结构损伤(裂纹, 脱层、应力集中、缺口) 的自动探测和控制; (2) 结构振动的主动控制, 阻尼被动控制与振动隔离; (3) 结构噪声的主动控制; (4) 复合材料梁、板类结构的低速冲击控制。为了对现有的 SMA 材料和 SMA 智能复合材料的性能进一步改善和扩充, 使其更具有实用性, 一些新概念新思路先后被提出。例如, 基于仿生复合材料的概念, 利用 NiTi 材料在生物体中易于生物亲和, 将其埋入低硬度的硅基材料中, 模仿生物组织结构[1]; 为提高 SMA 元的致动速度, 提出发展磁致动或电致动 SMA 的先进复合材料的构想[2]。混杂智能复合材料[3]则综合了 SMA 材料和其它不同智能材料在感应和驱动方面表现出的优良性能, 有可能实现宽频激扰下的振动主动控制的目的。目前一种类似于 SMA 的新智能材料, 即形状记忆塑料(SMP) 也已问世[3]。这种材料制造成本低、易于加工和培养记忆功能。

1 本构关系

1.1 SMA 本构关系

SMA 的本构模型大致可分为: 基于热动力学理论, 根据化学自由能的构成建立的本构模型[4, 5]; 从相界运动动力学出发, 推导的本构模型[6, 7]; 唯象理论模型[8~11]; 基于能量耗散原理的模型[12, 13]。上述模型当中, 建立在实验基础上的, 描述 SMA 宏观行为的唯象理论模型(包括①热力学、热动力学和相变动力学本构关系[8, 9], ②带有塑性理论特点的本构关系[10, 11]) 由于实用性强以及参数体系的便于确定, 因而在 SMA 智能复合材料结构的分析应用中发挥着巨大的作用。

1.2 SMA 智能复合材料本构关系

为了更好地感知和驱动复合材料结构, 只知道 SMA 材料的力学性态显然是不够的, 还必须深入了解 SMA 元与基体材料的相互作用的力学行为。

早期建立的普通纤维增强复合材料结构的细观本构模型, 如复合材料圆柱装配法(CCA)[14]和广义自洽方法(GSCS)[15], 以及经典的混合定则均可直接推广用于求解 SMA 纤维增强复合材料结构的等效宏观力学性能参数[16~18], 从而建立其等效的本构关系。但这些模型是在平均组分应力/应变假设基础上提出的, 不能反映各组分应力的变化。为此, 近年来又发展了所谓多胞模型[19]与同心圆柱模型[19]。多胞模型的代表体积元——胞被划分为一组子域, 每个子域必包含正方形的 SMA 纤维和一部分基体材料, 采用子域内应力的平衡条件, SMA 与基体界面的位移协调条件, 可建立其等效本构方程。

同心圆柱模型的代表体积元由三个相互嵌套的圆柱体构成, 它们是 SMA 纤维, 基体和无限厚的 SM 复合材料介质。与多胞模型相比, 同心圆柱模型能够更为精细地描述各组分的应力分布情况。

Aboudi 认为[20], 如果 SMA 纤维尺寸比其它组分的特征尺度大得多, 而且 SMA 纤维的体积含量较小时, 采用所谓细-宏观本构模型(或称高阶模型) 比多胞模型和同心圆柱模型, 更能反映客观实际。高阶模型将多相材料看成是由若干个广义单位胞构成, 每个单位胞包含8个子胞, 非弹性(马氏体相变) 引起的高阶应力场需要采用子胞的局部坐标的高阶勒让德多项式逼近。Baburaj 等人[21, 22]则针对 SMA 纤维混杂复合材料单层和层合板提出了相应的细-宏观本构模型。虽然大多数模型仅涉及 SMA 纤维增强体, 但也有研究涉及讨论球状和片状 SMA 增强体的三维细观本构模型[23]。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　工程应用

2.1　振动、噪声的主动控制

结构的稳态振动可采用主动模态修改[3]的方法控制。该方法的基本原理是通过加热材料中的 SMA 元件, 使得结构的整体刚度或局部刚度得到调整。该方法可行性的依据在于, 随温度的变化, SMA 的杨氏模量会发生明显的改变, 如图1所示。

另外还可采用主动应变能调节[3]的方法进行稳态振动控制。控制的原理在于, 受 SMA 主动元驱动作用时, 结构进入残余应变状态, 与之相应的应变能改变了结构的能量平衡状态, 因此, 结构的弹性动力学响应也随之发生变化。Rogers[24]采用主动应变能法对两端固支的混杂 NiTi/石墨/环氧树脂复合材料梁进行振动控制。NiTi 丝的奥氏相变的结束温度为30℃, 直径为0.38mm, 预应变为5%。该结构的基频随温度的变化曲线如图2所示。

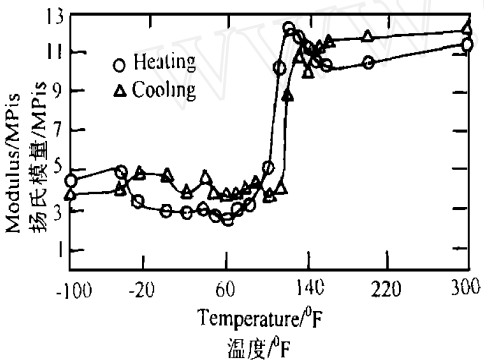


图1　NiTi 的扬氏模量随温度变化曲线

Fig. 1　Young's modulus of a NiTi vs temperature

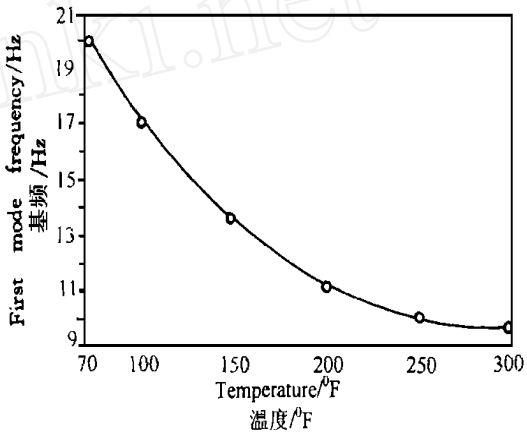


图2　两端固支石墨/环氧梁固有频率随温度变化的情形

Fig. 2　Natural frequency vs temperature at a clamped-clamped graphite-epoxy beam

结构瞬态振动的控制通常是利用 SMA 元产生力(分布力或集中力)来消耗振动能量, 从而抑制或阻止结构振动。所以, 在 SMA 纤维增强复合材料设计过程中, 一般是将 SMA 纤维对称于结构的中性轴/层, 进行铺设, 以便产生回复弯矩。图3表示按照简单的速度反馈控制方案的悬臂梁瞬态振动的控制结果[24]。

上述两种主动振动的控制方法同样可用于控制结构噪声。一系列的研究已经表明[24~27], 基于不同的闭环控制策略, 能够实现 SMA 混杂板梁类智能复合材料结构噪声的最优主动控制功能, 辐射噪声的声压水平均可降低到背景噪声的范围内。

振动及其噪声的主动控制中, 当前最为突出的困难是埋入基体的 SMA 驱动元响应速度太慢(驱动频率低于10Hz), 无法控制高频振动。其中的主要原因是传统的电阻加热与强制对流冷却的热交换机制限制了 SMA 加热和冷却的速度, 另外 SMA 的热滞现象也是不利的因素。有关这一问题的研究已经引起关注[28, 29]。

2.2　振动的被动控制

除了利用主动控制的方法, SMA 复合材料在马氏体相变中的高迟滞阻尼及其在高温奥氏相的伪弹性迟滞阻尼特性, 均可用于实现结构振动的被动控制的目的。

图4为 CuZnAl SMA 材料的内耗散因子 Q^{-1} 随温度 T 改变的关系曲线[30]。低温马氏体相具有较高的阻尼(Q^{-1} 可达到10%), 而高温奥氏体相的阻尼较低(Q^{-1} 约为1%)。普通合金如

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

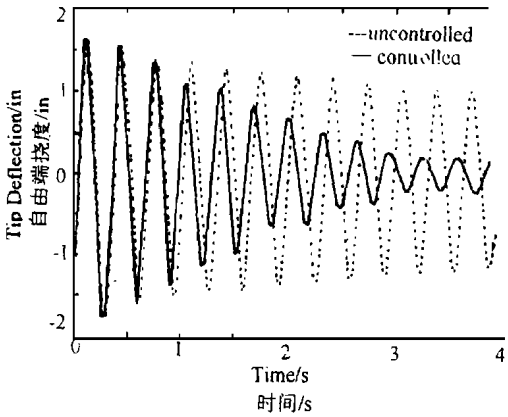


图3 悬臂梁振动受控和未控结果比较

Fig. 3 Controlled vs uncontrolled vibration of a cantilever beam

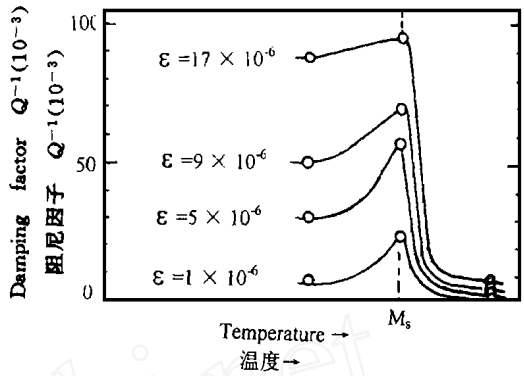


图4 Cu-Zn-Al形状记忆合金的耗散因子随温度变化情形

Fig. 4 Loss factor of a Cu-Zn-Al SMA vs temperature for various strain amplitudes

钢和铝的内耗散因子大约是0.5%左右。SMA 材料的较强阻尼能力是马氏体逆向运动引起的。许多因素如应变、应力和激励频率都会影响 SMA 的阻尼特性。普通的阻尼材料,如丙烯酸类橡胶、天然橡胶、聚合物等,虽然内耗因子介于0.1和0.01之间,但是橡胶类阻尼材料的弹性模量与 SMA 模量相比却低得多(橡胶类材料弹性模量约为70MPa, SMA 弹性模量约为80GPa)。另外, SMA 的强度比普通阻尼材料高得多,并且在拉压,剪切状态下的阻尼系数都是相同的。SMA 混杂复合材料结构的被动振动控制应用的研究内容近来已经包括 SMA 纤维复合材料的被动阻尼特性[31], SMA 纤维复合材料层合结构的被动阻尼特性[22], SMA 蒙皮和树脂夹层复合材料隔振性能[32], SMA 颗粒复合材料的被动阻尼性能[33],这些研究均已初步证实,混杂 SMA 之后的复合材料结构的被动阻尼能力比传统的粘弹性阻尼材料得到明显改善,因而使得 SMA 作为一种崭新的被动阻尼材料的进一步广泛使用成为可能。

2.3 复合材料梁、板结构的抗低速冲击设计

提高复合材料的抗冲击能力包括纤维和基体的韧化处理,材料在复合界面的韧化处理及其沿材料厚度方向的增强。除上述方法外,最先进的方法是和其它智能材料的混杂化。研究发现,经受同样大小的低能量冲击,普通石墨/环氧复合材料板比与 SMA 纤维混杂得到的复合材料板的破坏程度严重得多,前者在冲击处几乎被穿透[34]。将石墨/环氧复合材料与NiTi纤维混杂,由于利用了NiTi材料的高达8%的超弹性可恢复应变和超过20%的极限应变,结构吸收冲击能量的塑性变形机制因此大为增强,表现出令人满意的抗冲击能力[35]。研究进一步表明,埋入 SMA 纤维体积含量的改变会导致冲击韧性的明显改变[36, 37]。例如,当 SMA 的体积含量仅为2.8%,则离层破坏大约可降低25%,若 SMA 体积含量增加为6%,则能量吸收增加到41%。此外,如果将 SMA 层粘贴在结构受冲击表面,必然会改善结构的抗冲击侵彻的阻力[38]。

Birman 等[39]还针对 SMA 纤维在矩形板基体结构中的优化配置问题进行研究,发现如果 SMA 纤维的取向平行于板的短边,横向冲击在这种情况下产生的位移要比其余配置下的位移小得多。

2.4 裂纹的诊断及其裂纹扩展的主被动控制

埋入结构裂纹尖端附近的NiTi丝由于裂纹的扩展而伸长,电阻率也随之相应增加(NiTi的电阻率对应变非常敏感),达到一定数值后,通过控制回路发出控制信号,于是通电加热Ni-

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Ti 丝产生相变驱动回复力迫使裂纹闭合。光弹实验已经表明[40~42], 由于 NiTi 的驱动作用, 裂纹尖端的强度因子将因为压应力的出现, 急剧地减小。这就是采用 SMA 智能复合材料实现裂纹主动探测和控制的原理。裂纹的被动控制主要是利用裂纹尖端附近的 SMA 丝或带的超弹性性能, 在裂纹表面始终产生一个驱使裂纹闭合的回复应力, 于是随着受力状态的改变, 裂纹尖端强度因子也随之减小。

3 结　　论

虽然 SMA 智能复合材料结构的研究近来已取得一系列进展, 并且开始逐步进入工程应用阶段, 但由于其中许多理论和技术难题尚未突破, 距实用化目标还有相当大的差距。特别是在某些方面, SMA 智能复合材料的研究还只是一种概念性的探索。许多研究工作有待于今后的进一步深入进行, 下面就本领域今后的研究谈几点看法。

(1) 必须结合实际, 深入研究 SMA 智能复合材料的本构行为, 使其能够适用于某些特殊的应用环境。同时也需要加强相应的实验研究工作。开展相关的有限元数值模拟研究, 建立适合于处理包括 SMA 相变非线性的有效的迭代算法。

(2) 由于复合工艺的影响以及 SMA 与其它组分材料特性的较大差异, SMA 元的残余应力易萌生界面损伤破坏, 研究这种破坏过程的机理将有益于改善 SMA 智能复合材料的力学性能。

(3) 在应用方面, 必须优先解决的几项关键课题包括: 发展先进的热传导方法, 以提高 SMA 作动器的驱动频率; SMA 智能元的最优配置问题; 含有多个 SMA 智能元的复合作动, 用于结构变形和振动主动控制的有效控制策略与方法; 不同表面复合方法对 SMA 性能的影响; SMA 循环疲劳衰减行为机理。

参 考 文 献

1 Barrett R, Gross R S. Super-active shape-memory alloy composites. *Smart Mater Struct*, 1996, 5 (3): 255~260

2 George R, Barsoum S. Active materials and adaptive structures. *Smart Mater Struct*, 1997, 6: 117~122

3 Gandhi M V, Thompson B S. Smart materials and structures. London: Chapman & Hall, 1992

4 Falk. Pseudoelastic stress-strain curves of polycrystalline shape memory alloys calculated from single crystal data. *Int J Eng Sci*, 1989, 27: 277~284

5 Maugin, Cadet S. Existence of solitary waves in martensitic alloys. *Int J Eng Sci*, 1991, 29(2): 243~258

6 Abeyaratne R, Knowles J. A continuum model of thermoelastic solids capable of undergoing phase transitions. *J Mech Phy Solids*, 1993, 41: 541~571

7 Chien H W. Stress-induced phase transformations in solids and the associated double-well potentials. *Int J Solids Structures*, 1995, 32 (3/4): 525~542

8 Tanaka K, Sato Y. Phenomenological description of the mechanical behaviour of shape memory alloys. *Trans of JSME*, 1992, 53(491): 1368~1373

9 Liang, Rogers C A. A multi-dimensional thermomechanical constitutive relation for shape memory alloys. *J Eng Mathematics*, 1992, 26: 429~443

10 Boyd J G, Lagoudas D C. Thermomechanical response of shape memory composites. *J Intell Mater Syst Struct*, 1994, 5 (3): 333~346

11 Graesser E J, Cozzarelli F A. A proposed three-dimensional constitutive model for shape memory alloys. *J Intell Mater Syst Struct*, 1994, 5 (1): 78~89

12 Tanaka K. A thermodynamical sketch of shape memory effect: one dimensional tensile behavior. *Res Mech*, 1986, 18:

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

251～263

13 Ivshin Y, Pence T J. A thermomechanical model for a one variant shape memory material. *J Intell Mater Syst Struct*, 1994, 5 (4): 455～473

14 Hashin Z. Theory of fiber reinforced materials. *NASA* CR-1974. USA, 1974

15 Christensen R M, Lo K H. Solutions for effective shear properties of three-phase sphere and cylinder. *J Mech and Phy Solids*, 1979, 37: 315～330

16 Sullivan B J. Analysis of properties of fiber composites with shape memory alloy constituents. *J Intell Mater Syst Struct*, 1994, 5: 825～832

17 Brinson L C, Lammering R. Finite element analysis of the behavior of shape memory alloys and their applications. *Int J Solids and Structures*, 1993, 30 (23): 3261～3280

18 Liang, Rogers C A. The multi-dimensional constitutive relations of shape memory alloys. AIAA Paper 91-1165, USA, 1991

19 Birman V, *etc*. Micromechanics of composites with shape memory alloy fibers in uniform thermal fields. *J AIAA*, 1996, 34 (9): 1905～1912

20 Aboudi J. The response of shape memory alloy composites. *Smart Mater Struct*, 1997, 6: 1～9

21 Baburaj V, Matsuzaki Y. Material damping analysis of a smart hybid composite lamina. *J Intell Mater Syst Struct*, 1994, 5: 647～653

22 Baburaj V, *etc*. An accurate prediction of specific damping capacity of TiNi SMA composite through a three-dimensional constitutive model. *J Intell Mater Syst Struct*, 1996, 7: 145～149

23 Mori Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*, 1973, 21: 571～574

24 Rogers C A. Active vibration and structural acoustic control of shape memory alloy hybrid composites: Experimental results. *J Acoust Soc Am*, 1990, 88 (6): 2803～2811

25 Fuller C R, *etc*. Active structural acoustic control with smart structures. SPIE Conf 1170 on Fiber Optic Smart Structures and Skins Ⅱ, USA, 1989

26 Saunder W R, *etc*. Experimental studies of structural acoustic control for a shape memory alloy composite beam. In: Proc of the 31st Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Long Beach: CA, *AIAA*, 1990. 2274～2282

27 Saunders W R, Rogers C A. Structural acoustic control of a shape memory actuator. *J Intell Mater Syst Struct*, 1991, 2: 508～527

28 Shahin A R, *etc*. Enhanced cooling of a shape memory alloy wire using semiconductor "Heat Pump" modules. *J Intell Mater Syst Struct*, 1994, 5 (1): 95～105

29 Bhattacharyya A, *etc*. On the role of thermoelectric heat transfer in the design of SMA actuators: theoretical modeling and experiment. *Smart Mater Struct*, 1995, 4: 252～263

30 Dejonghe W, *etc*. Temperature-and amplitude-dependence of internal friction in Cu-Zn-Al alloys. *Metal Science*, 1997, 523～530

31 Rogers C A. Novel design concepts utilizing shape memory alloy reinforced composites. Proc Am Soc of Composite Materials, New York, Technomic Publishing co. 1988, 719～731

32 Bryan J H, *etc*. Evaluation of a constitutive model for shape memory alloys embedded in shell structures. *J Reinforced Plastics and Composites*, 1996, 15: 1249～1261

33 Furuya Y. Design and material evaluation of shape memory composites. *J Intell Mater Syst Struct*, 1997, at Press

34 Chong K P, *etc*. Engineering research in composite and smart structures. *Composite Engineering*, 1994, 4(8): 829～852

35 Paine J S N. Multi-functional SMA hybrid composite materials and their applications. [Ph. D. Dissertation]. VPI & SU, Blacksburg, Virginia, Mechanical Engineering Dept, 1994

36 Paine J S N, Rogers C A. The response of SMA hybrid composite materials to low velocity impact. *J Intell Mater Syst Struct*, 1994, 5: 530～535

37 Kiesling T C, *etc*. Impact failure modes of thin graphite epoxy composites embedded with superelastic Nitinol. Proc of 37th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Salt Lake City, U-

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

tah, 1996, 1448～1257

38 Paine J S N, Rogers C A. Observations of the drop-weight impact response of composites with surface bonded Nitinol layers. Proc of Durability and Damage Tolerance of Composites Symposium, San Francisco, ASME IMEC & E, CA, 1995

39 Birman V, *etc*. Global strength of hybrid shape memory composite plates subjected to low-velocity impact. *J of Reinforced Plastics and Composites*, 1997, 16 (9): 791～809

40 杜彦良, 聂景旭. 主动探测裂纹和控制裂纹扩展的智能材料结构. 力学进展, 1994, 24 (4): 499～510

41 Rogers C A, Rogers R C (Eds). Recent advances in adaptive and sensory materials and their applications. Technomic, Lancaster. PA, 1992

42 Rogers C A. Rebuilding and enhancing the nation's infrastructure: a role for intelligent materials systems and structures. Report of and NSF workshop at Williamsburg, Virginia, Virginia Polytechnic Institute, 1993

43 Nagaya K, Ryu H. Deflection shape control of a flexible beam by using shape memory alloy wires under the genetic algorithm control. *J Intell Mater Syst Struct*, 1996, 7: 336～341

DEVELOPMENT OF SMA SMART COMPOSITE STRUCTURES RESEARCH

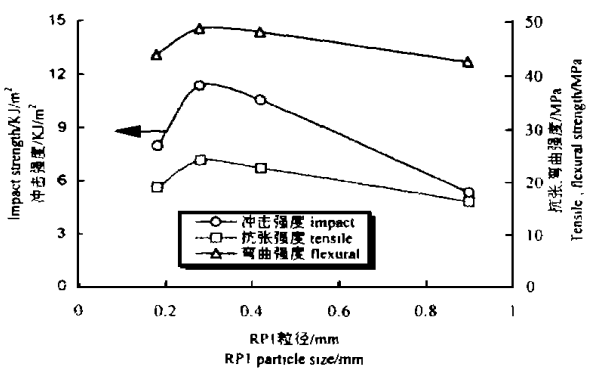
Ren Yongsheng
(Institute of Electromechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract This paper gives a brief introduction to recent development in SMA intelligent composite structures research. Emphasis is placed on results dealing with constitutive modeling, vibration, structural acoustics, low velocity impact and crack growth control by embedding SMA in composite structures. Some further investigations of this area are also suggested.

Key words SMA intelligent composite, vibration and structural acoustics, low-velocity impact, crack growth, active and passive control

更正与致歉

1. 本刊1998年(第15卷)第1期第4页"废硫化胶粉增韧BMC的实验研究"(华南理工大学 庞永新 等)一文的图3, 因编校者的疏忽, 将图印反, 正确的图3如右, 特此更正。



2. 本刊同期第39页"制取带中间层的Al_2O_3+Ni复合材料的工艺研究"(北京航空航天大学 李树杰 等)一文应为"国家自然科学基金资助项目(批准号59571007)", 因编校者疏忽, 排版时遗漏, 特此更正。

以上二项, 专职编委申从祥并代表该期责任编辑向作者和读者致歉。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net