

形状记忆聚合物复合材料及其在空间可展开结构中的应用

冷劲松, 兰 鑫, 刘彦菊, 杜善义

(哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080)

摘 要: 综述了形状记忆聚合物复合材料及其在空间可展开结构中的应用。形状记忆聚合物是一种智能主动变形的高分子材料, 该材料在外界激励作用下能够产生较大的可回复变形, 可应用于智能主动变形结构。首先简述了形状记忆聚合物的研究现状, 然后分别介绍了颗粒、短纤维和连续纤维增强的形状记忆聚合物复合材料的研究现状, 并重点评述了三种复合材料的电-热致驱动变形性能。此外, 本文还介绍了纤维增强形状记忆复合材料在空间可展开结构上的应用, 主要包括可展开铰链、可伸缩梁和可展开天线等。

关键词: 智能材料与结构; 形状记忆聚合物; 复合材料; 空间可展开结构; 主动变形

中图分类号: V45 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2010)04-0950-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.04.002

0 引言

智能材料与结构(Smart/Intelligent Materials and Structures)是一门新兴的多学科交叉的综合科学, 是当前学科发展的国际前沿之一^[1-2]。智能材料与结构技术集传感、作动和控制于一体, 使结构不仅具有普通材料所具备的承载功能, 还具备特殊的感知功能和响应功能。其中传感材料用来感知内外部环境信息, 作动器用来改变结构的物理性质和结构形状, 并最终实现结构的自诊断、自适应或自修复等多种功能。

在智能材料和结构技术的发展中, 一种主动大变形材料—形状记忆聚合物(Shape Memory Polymers, SMPs)逐渐成为研究的热点之一^[3-7]。该材料在一定条件作用下能够主动产生高达 100% 的大回复变形, 因此在智能主动变形结构研究领域显示出巨大的应用潜力。形状记忆聚合物按激励形式的不同可分为热致^[8]、电致^[9]、光致^[10]和溶液驱动^[11-14]等类型。其中, 热致型形状记忆聚合物具有激励形式简单、可回复形变量大和响应速度快等优点, 是研究最为广泛和深入的。图 1 为热致形状记忆聚合物的热-机械变形过程: 在玻璃化转变温度(Glass Transition Temperature, T_g)以上, 对形状记忆聚合物

(起始态)施加外力使其变形; 在保持外界约束的前提下, 使其降温至 T_g 以下一定温度, 撤去外界约束, 所赋变形能被长期保持下来(变形态); 当再次加热至玻璃化转变温度以上时, 形状记忆聚合物能自动发生形状回复(回复态)。至此, 完成“记忆起始态→固定变形态→恢复起始态”的变形循环。在本构关系研究方面, 由于该材料的变形较大, 需要考虑材料非线性, 这增加了研究的难度。现在的本构关系模型主要包括基于粘弹性理论的 Tobushi 线性和非线性模型^[15], 以及基于相理论的细观力学模型^[16]。Tobushi 非线性模型考察了形状记忆聚合物的应力、应变和温度在其变形循环中的相互关系, 其最大应变量达到 20% 以上, 该理论模型有效印证了实验结果; 在细观力学模型的研究中, Liu^[16] 在假设形状记忆聚合物由固定相和可逆相组成的基础上, 有效地研究了材料在单向拉伸的非线性变形条件下的形状记忆特性。

在智能材料与结构领域, 形状记忆聚合物的研究已相对成熟。迄今为止, 法国、日本、美国等国家已相继开发出形状记忆聚氨酯(日本三菱重工)、形状记忆环氧树脂(美国 CTD 公司)、形状记忆苯乙烯(美国 CRC 公司)、形状记忆聚酯、形状记忆氰酸酯、形状记忆苯乙烯-丁二烯共聚物、形状记忆反式聚

异戊二烯、降冰片烯等热固性和热塑性形状记忆聚合物材料。目前,在世界范围,有关形状记忆聚合物

及其复合材料方面的研究单位已超过 60 个。

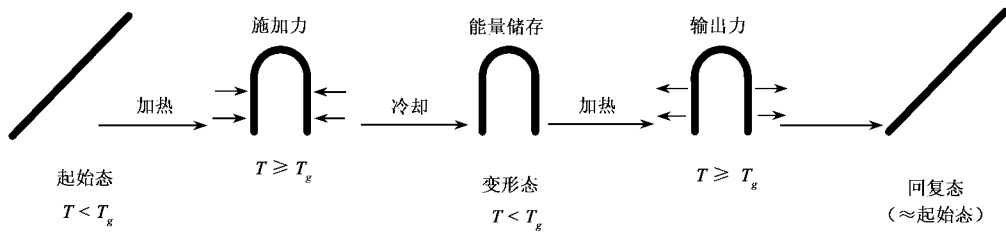


图 1 形状记忆聚合物材料的形状记忆效应

Fig. 1 Illustration of the shape memory process of SMPs

1 形状记忆复合材料

形状记忆聚合物的主要特点是可回复应变较大,一般能达到 10%~100%。但主要缺点是材料的模量、强度等力学和热-力学性能较差,如变形的回复输出力较小,运动稳定性和可靠性较差,蠕变和松弛现象较严重等,这些缺点影响了其应用,特别是在航天飞行器上的应用^[17]。因此,研究人员自然想到利用形状记忆聚合物来制造其复合材料,以克服上述缺陷。形状记忆复合材料具有可回复应变大、变形回复输出力较大、可靠性高、低密度、高刚度、高强度和低成本等优点。

形状记忆复合材料按增强相的种类大致分为三类,颗粒填充复合材料^[18-20]、短纤维增强复合材料^[21-22]、纤维增强复合材料^[17, 23]。颗粒填充形状记忆复合材料主要作为功能材料,如向其中填加导电颗粒能制备电驱动的形状记忆聚合物。该材料具有可回复应变大、回复力较大等优点,但是其综合力学性能相对较差,不宜作为大型结构材料。对其力学性能的研究多采用细观力学的方法,如使用 Mori-Tanaka 模型研究球形颗粒参杂的形状记忆复合材料的变形特性。纤维增强形状记忆复合材料主要作为结构材料,其综合力学性能较好,具有回复力较大、结构刚度和强度较高等优点。但是由于纤维增强相的可回复应变较小(一般<2%),其纤维增强方向一般不能作为变形的主方向,因此,在实际应用中多利用层板状纤维增强复合材料的大挠度弯曲变形以达到驱动的目的。对其力学特性的研究,多考虑大挠度弯曲变形条件下的结构展开动力学以及复合材料的屈曲变形特性。此外,短纤维增强形状记忆复合材料的力学性能和变形能力介于以上两者之间,其研究和应用也开始受到重视。

1.1 颗粒填充形状记忆复合材料

Gall K 等^[24]研究了 SiC 纳米颗粒填充的形状记忆环氧复合材料的力学和热机械特性。该材料中添加了 0wt% 和 20wt% 的 SiC 颗粒,最大拉伸应变为 11% 和 15%, SiC 纳米颗粒增强了体系的弹性模量及回复力。形状记忆复合材料在 60°C ($T_g - 10^\circ\text{C}$) 以下变形时,回复应力先达到一个极大值,然后应力逐渐减小。在 80°C ($T_g + 10^\circ\text{C}$) 变形时,应力随温度上升而缓慢下降,形状记忆材料的回复应力在 10~100 MPa 量级。此外, Huang WM^[25-26]研究了碳黑填充的形状记忆聚氨酯复合材料。该形状记忆复合材料具有良好的导电性和形状记忆性能,并首次发现了形状记忆聚合物的水驱动效应:形状记忆聚合物吸收水份以后其玻璃化温度下降,即间接实现形状记忆聚合物的水驱动变形回复。韩国的研究人员还研究了碳纳米管填充的形状记忆聚氨酯复合材料,该材料比聚氨酯材料具有更高的弹性模量,同时表现出良好的导电性。还有人研究了陶瓷颗粒、碳黑、碳纳米管填充的形状记忆聚合物材料在红外光照射加热条件下的形状记忆效应^[27-28]。另外, Fe₃O₄ 等磁性颗粒也被加入热塑性形状记忆聚合物中,得到磁响应的形状记忆复合材料^[29-30]。Leng^[18]等还制备了形状记忆聚合物/镍粉复合材料,通过对固化过程中的复合材料施加磁场使镍粉呈链状排布(图 2),并研究链状排布镍粉对复合材料的力学、热机械性能的影响。由扫描电镜图(图 2,左栏)可知, Ni 粉含量从 5% 开始其链状结构已逐渐形成,且随着 Ni 粉含量的增加, Ni 链密度也随之增加。此外, Ni 链在形状记忆复合材料经历 5 次 50% 的拉伸变形后,仍能保持完好的链状结构(图 2,右栏),这是该材料应用于大变形结构的基础。图 3 给出了随温度升高 Ni 粉成链样品(平行于链方向)与均匀分

布样品的储能模量的变化。由图可知,对于某一固定 Ni 粉含量的样品, Ni 粉成链样品(平行于链方向)的储能模量大于均匀分布的样品的储能模量。这证明了 Ni 粉成链结构对形状记忆聚合物的力学性能具有更强的增强作用。

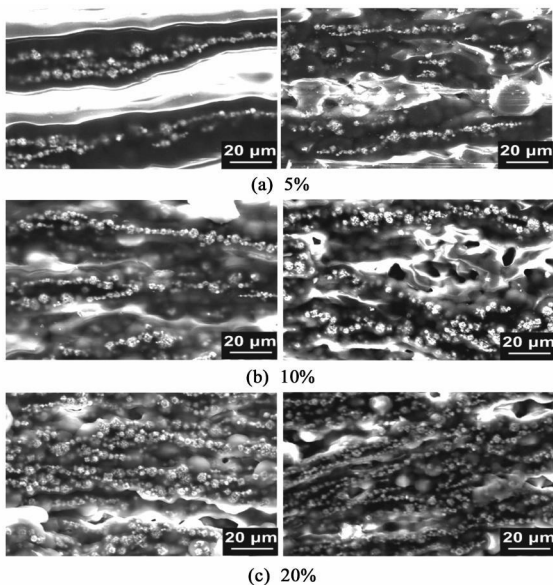


图 2 典型的 Ni 粉链状结构(左栏)及其在经历 5 次 50% 的拉伸应变后(右栏)的形貌^[18]

Fig. 2 Typical SEM images before (left column) and after (right column) five stretching (at 50% strain)-shape recovery cycles

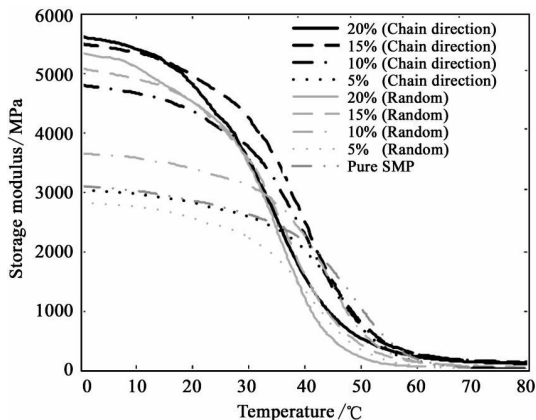


图 3 Ni 粉成链样品(平行于链方向)与均匀分布样品储能模量随温度的变化^[18]

Fig. 3 Typical storage modulus versus temperature curves obtained from DMA test

基于链状结构的镍粉能够增强形状记忆聚合物的导电性这一结论, Leng^[19] 将极少量的镍粉(0.5 vol%)添加于碳黑填充的形状记忆复合材料中, 以进一步增强其导电性。图 4 给出了添加 Ni 粉和碳

黑颗粒的复合材料的形状回复过程及其温度场分布。三种样品(a[SMP/ CB/ Ni (chained), b[SMP/ CB/ Ni (random)], c[SMP/ CB])的导电碳黑含量均为 10%, 但 Ni 粉含量和成链状态不同。

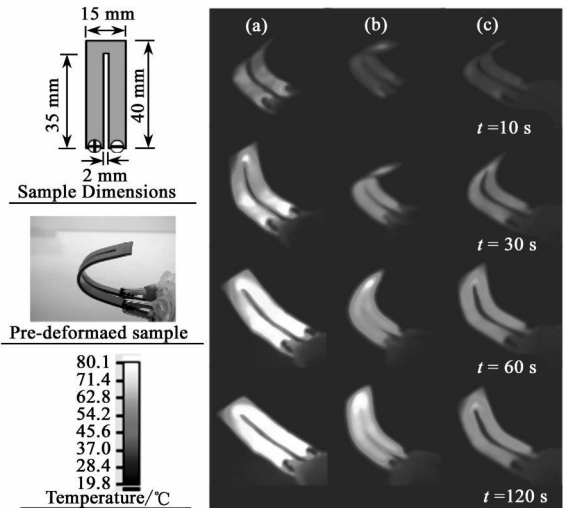


图 4 SMP/ 碳黑/ 镍粉复合材料在 30 V 电压加热条件下的温度分布及电驱动过程

a[SMP/ CB/ Ni (chained), b[SMP/ CB/ Ni (random)], c[SMP/ CB]^[19]

Fig. 4 Sequence of shape recovery and temperature distribution of SMP/ CB/ Ni composite by applying a 30V voltage

1.2 短纤维增强形状记忆复合材料

Ni Q Q^[30] 等学者研究了短切玻璃纤维增强的聚氨酯形状记忆复合材料, 其增强相显著提高了材料的弹性模量、强度和抗蠕变及松弛能力。Leng^[21-22, 32] 将纳米碳黑颗粒和短切碳纤维添加到聚合物中, 通过颗粒和短纤维的协同作用形成导电网络, 提高了材料内部形成导电网络的几率。图 5 给出了电阻率与填充相含量的关系, 结果表明纳米导电颗粒复合材料的导电性优于微米导电颗粒复合材料。另外, 导电颗粒的加入对复合材料的玻璃化转变温度也存在较大的影响, 碳黑纳米颗粒的加入明显降低了材料的转变温度。

1.3 纤维增强形状记忆复合材料

常规的纤维增强树脂基复合材料的可回复应变一般为 1%~2%, 主要考虑材料的强度、模量等静态或准静态条件下的力学承载性能, 而不考虑材料主动变形的驱动特性。因此, 常规树脂基复合材料主要用于结构承载, 而不可能作为类似于人工肌肉这种能够产生主动大变形的驱动材料^[33-34]。近年来, 碳纤维增强形状记忆复合材料开始应用于主动变形结构。

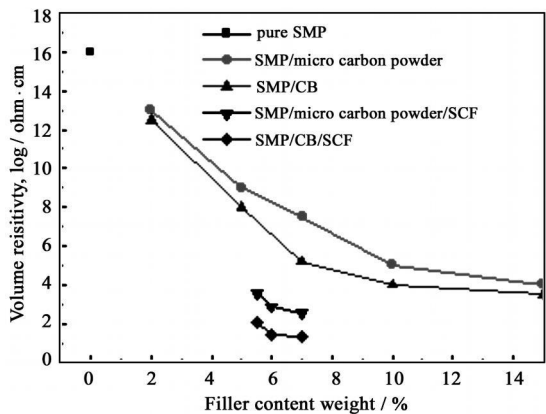


图 5 SMP/ 碳黑/ 短纤维形状记忆复合材料的电阻率^[21]

Fig. 5 The resistivity of SMP/ CB/ short-fiber composite

该形状记忆聚合物复合材料, 经特定结构设计和适当调节增强相含量后, 既具有较好的形状回复性能(如图 6), 又具有良好的导电性(即具有电致驱动特性)^[17]。而在某些需要精确控制材料变形特别是微小变形的场合, 电控制往往比外界加热控制更方便可行, 因此导电形状记忆复合材料也具有更广阔的应用前景。美国 CTD 公司^[33]、美国 CRG 公司^[34] 和哈尔滨工业大学等单位研制了碳纤维增强的环氧形状记忆聚合物复合材料, 这些电致驱动的形状记忆复合材料既具有较高的可回复变形率, 同时具有较高的弹性模量和较强的抗蠕变、抗松弛能力。

2 纤维增强形状记忆复合材料在空间可展开结构

中的应用

由于航天器尺寸的限制, 空间可展开太阳能电池阵、桁架和天线等大型结构在发射前必须折叠, 当在轨工作后需经历展开过程以达到工作状态。具有大变形特性的形状记忆聚合物在空间可展开结构领域显示出较大的应用潜力。近年来, 形状记忆聚合物的合成已趋于成熟, 一些形状记忆聚合物复合材料元器件已经完成原理性演示验证, 并开始获得型号上的应用。例如, 美国冲击号卫星 (Encounter Spacecraft) 已经于 2006 年发射并将形状记忆材料用于天线结构的展开。已发射的美国智能微型可控卫星 (DiNO Sat) 太阳能电池板和美国 Road Running 卫星的太阳能电池板, 也应用形状记忆聚合物复合材料铰链进行驱动。装有形状记忆聚合物复合材料展开梁的 FalconSat-3 大气观测卫星, 也预计于 2011 年左右由美国空军实验室发射。另外, NASA 的先进概念研究所也正在大力资助空间网状智能可

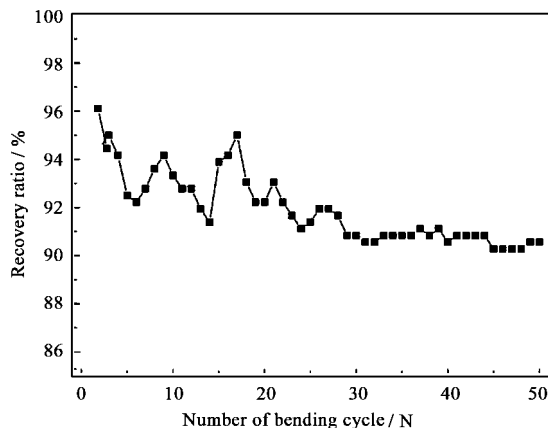


图 6 纤维增强形状记忆复合材料在多次变形过程中的回复率 ($T = T_g + 20^\circ\text{C}$)

Fig. 6 Shape recovery ratio versus the number of bending cycle at $T_g + 20^\circ\text{C}$

展开结构的研究, 以期在未来得到广泛的军事和商业应用。

在形状记忆复合材料应用于可展开结构的研究中, 需要重点考虑的力学问题是结构展开动力学和复合材料微观后屈曲的变形特性。在展开动力学的研究中, 需要考察复合材料力学性能(玻璃化转变温度和热-力学性能等), 结构特征(纤维体积含量、圆弧角、厚度、长度、边界条件)与结构展开性能(展开刚度等)的关系。此外, 形状记忆复合材料的回复性能不仅由基体的形状记忆性能决定, 还与纤维和形状记忆树脂间的微观变形特性相关。在复合材料受压屈曲变形条件下, 材料最大非破坏应变超过 5%, 远远大于增强纤维的变形极限。Francis^[35] 研究了形状记忆聚合物复合材料在弯曲变形过程中纤维的局部后屈曲变形行为, 求得了中性面(应变为零)的移动距离和纤维屈曲波长等关键参数的表达式。

哈尔滨工业大学研制了热固性苯乙烯基和环氧基形状记忆聚合物^[5], 并完成了环氧基形状记忆聚合物及其复合材料的抗空间极端环境(温度、辐照和真空等)的性能测试。该单位研究人员还利用环氧形状记忆复合材料设计并制造了可展开空间结构, 包括可展开铰链、桁架和天线等。其中, 形状记忆聚合物复合材料铰链的展开过程如图 7^[7], 该铰链在 100 s 内完成展开。在此基础上, 研究人员还尝试将此铰链应用于太阳能电池阵模型的驱动展开(如图 8)。由于形状记忆高分子材料的阻尼较大, 这使得形状记忆复合材料展开结构的展开运动过程较为平缓, 不易对系统造成较大的冲击。

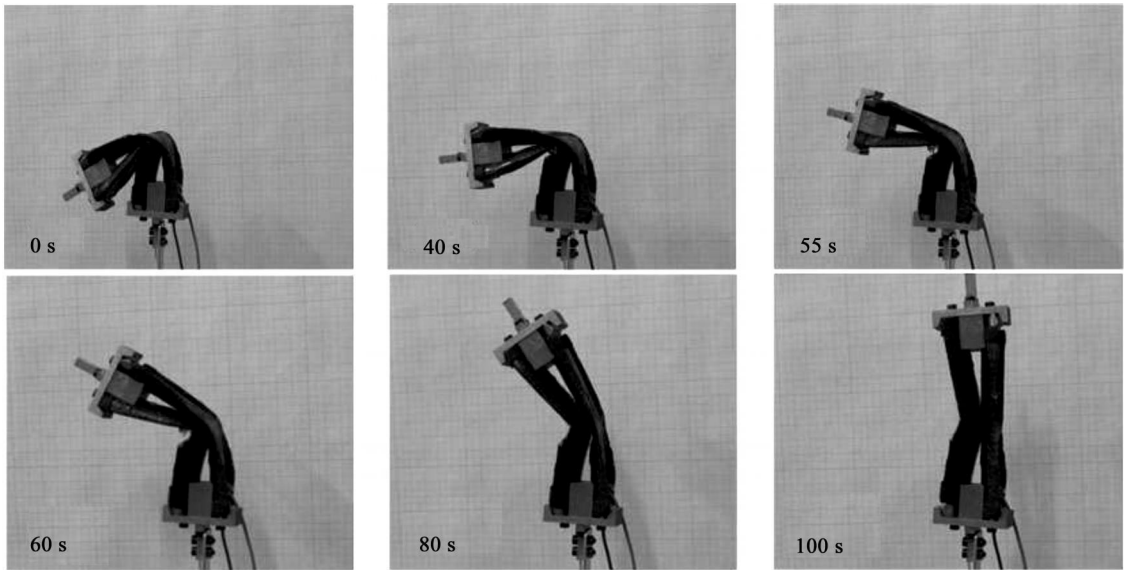
图 7 形状记忆复合材料铰链展开过程^[17]

Fig. 7 Shape recovery process of SMPC hinge

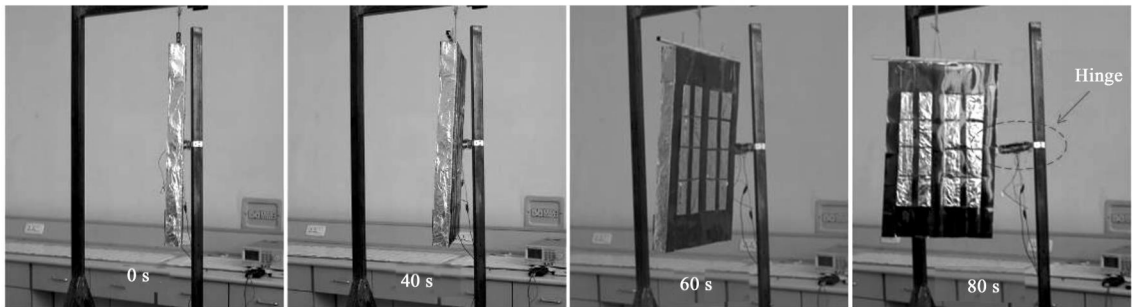
图 8 形状记忆复合材料铰链驱动太阳能电池阵模型的展开过程^[17]

Fig. 8 Shape recovery process of a prototype of solar array actuated by SMPC hinge

美国 CTD 公司参与了一项名为 DSX/PowerSail (Deployable Structures Experiment) 的研究计划, 该项目涉及一种大面积可展开的柔性太阳能电池阵结构。如图 9 所示, 该结构采用形状记忆复合材料可展开梁作为电池阵的展开驱动和工作支撑结构: 卷曲的管状形状记忆复合材料梁像卷尺一样纵向延伸; 柔性的太阳能电池阵即可随着两边缘的卷曲梁的运动而实现展开; 展开后, 形状记忆复合材料梁提供较强的刚性支撑以保证电池阵的正常工作。此外, 哈尔滨工业大学也研制了形状记忆复合材料可展开桁架。该桁架由三个纵向的圆弧形截面的形状记忆复合材料梁构成, 三条梁背面相对, 且沿圆周方向均匀分布(各自间隔 120°)。在桁架的折叠收缩状态, 三条纵向的形状记忆复合材料梁以 S 型折叠收缩, 随后对复合材料梁通电加热, 梁结构变形回复, 桁架实现展开。在该结构变形过程中, 梁结构的稳

定性和驱动性能是主要考察对象, 所研究的问题主要包括双稳态特性和展开动力学性能。

此外, 美国 CTD 公司开发了一种由条状形状记忆复合材料件支承的天线反射面。该天线反射面背面的上、下边缘处各固定连接有条状形状记忆材料的环向加强件。形状记忆固体表面可展开天线反射面可收缩折叠成伞型皱褶状结构, 其馈源和背架支撑结构与一般网状可展开天线相同^[37]。

3 结论

本文综述了形状记忆聚合物复合材料的研究现状及其在空间可展开结构中的应用。重点介绍了颗粒、短纤维和连续纤维增强的形状记忆聚合物复合材料的发展现状。本文还介绍了纤维增强形状记忆复合材料在可展开结构中的应用, 主要包括可展开铰链、可伸缩梁和天线等。纤维增强形状记忆复合

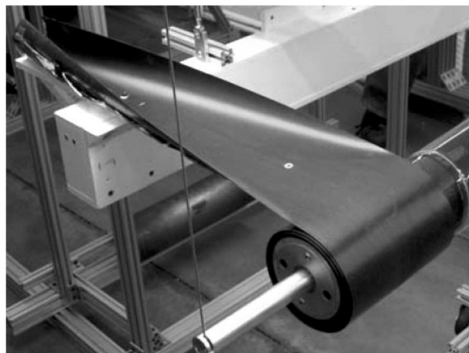
图9 管状形状记忆复合材料卷曲梁¹³⁶

Fig. 9 The shape memory truss

材料具有驱动和承载双重功能, 有望大量应用于空间可展开结构。此外, 形状记忆聚合物及其复合材料在生物医药、多功能材料与结构等领域也将有广泛的应用。

参考文献:

[1] 杜善义, 冷劲松, 王殿富. 智能材料系统和结构[M]. 科学出版社, 2001.[DU Shan-yi, LENG Jin-song, WANG Dian-fu. Intelligent material systems and structures[M]. Science Press, 2001.]

[2] DU Shan-yi, LENG Jin-song. A study on the optical fibre intelligent composite materials and its monitoring system[J]. Advances in Mechanics, 1992(22): 496—502.

[3] Behl M, Lendlein A. Shape-memory polymers[J]. Mater. Today, 2007, 10: 20—28.

[4] Ratna D, Karger-Kocsis D. Recent advances in shape memory polymers and composites: a review[J]. Journal of Material Science, 2008, 43: 254—269.

[5] Leng J S, Wu X L, Liu Y J. Effect of a linear monomer on the thermomechanical properties of epoxy shape-memory polymer[J]. Smart Materials Structures, 2009, 18: 095031.

[6] Gunes I S, Jana S C. Shape memory polymers and their nanocomposites: A review of science and technology of new multifunctional materials[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2008, 8: 1616—1637.

[7] Hu J L. Shape Memory Polymers and Textiles[M]. CRC Press LLC, 2007: 28—39.

[8] Liu Y, Gall K, Dunn M L, McCluskey P. The thermomechanics of shape memory polymer nanocomposites[J]. Mechanics of Materials, 2004, 36: 929—940.

[9] Leng J S, Lv H B, Liu Y J, Huang W M, Du S Y. Shape-memory polymer composite and its application[J]. MRS Bulletin, 2009, 34: 848—855.

[10] Lendlein A, Jiang H Y, Junger O, Langer R. Light-induced shape memory polymers[J]. Nature, 2005, 434: 879—882.

[11] Huang W M, Yang B, An L, Li C, Chan Y S. Water-driven programmable polyurethane shape memory polymer: demonstration and

mechanism[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86: 114105.

[12] Yang B, Huang W M, Li C, Li L. Effects of moisture on the thermomechanical properties of a polyurethane shape memory polymer[J]. Polymer, 2006, 47: 1348—1356.

[13] Leng J S, Lv H B, Liu Y J, Du S Y. Comment on Water-driven programmable polyurethane shape memory polymer: Demonstration and mechanism[Appl. Phys. Lett. 86, 114105, (2005)] [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92: 206105.

[14] Leng J S, Lv H B, Liu Y J, Du S Y. Shape-memory Polymer in response to solution[J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(6): 592—595.

[15] Tobushi H, Okumura K, Hayashi S, Ito N. Thermomechanical constitutive model of shape memory polymer[J]. Mechanics of Materials, 2001, 33(10): 545—54.

[16] Liu Y B, Gall K, Dunn M L, Greenberg A R, Diani J. Thermomechanics of shape memory polymers: uniaxial experiments and constitutive modeling[J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22: 279—313.

[17] Lan X, Wang X H, Liu Y J, Leng J S. Fiber reinforced shape-memory polymer composite and its application in a deployable hinge[J]. Smart Materials Structures, 2009, 18: 024002.

[18] Leng J S, Lan X, Huang W M, Liu Y J, Liu N, Phee S Y, Du S Y. Electrical conductivity of shape memory polymer embedded with micro Ni chains[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92: 014104.

[19] Leng J S, Huang W M, Lan X, Liu Y J, Liu N, Phee S Y, Du S Y. Significantly reducing electrical resistivity by forming conductive Ni chains in a polyurethane shape-memory polymer/carbonblack composite[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92: 204101.

[20] HUANG W M, LIU N, LAN X, et al. Formation of protrusive micro/nano patterns atop shape memory polymers[J]. Materials Science Forum, 2009, 14: 243—248.

[21] Leng J S, Lv H B, Liu Y J, Du S Y. Synergic effect of carbon black and short carbon fiber on shape memory polymer actuation by electricity[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104: 104917.

[22] Leng J S, Lv H B, Liu Y J, Du S Y. Electro-activate shape memory polymer filled with nanocarbon particles and short carbon fibers[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91: 144105.

- [23] Ohki T, Ni Q Q, Iwamoto M. Creep and cyclic mechanical properties of composites based on shape memory polymer[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2004, 11: 137-147.
- [24] Ken G, Martin L D, Liu Y P, et al. Shape memory polymer nanocomposites[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50: 5115-5126.
- [25] Huang W M, Lee C W, Teo H P. Thermomechanical behavior of polyurethane shape memory polymer foam[J]. *Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 100: 1-4.
- [26] Yang B, Huang W M, Li C. Nano-carbon powder filled shape memory polymer[C]. *The 1st International Symposium of Nanotechnology*, Singapore, 2004: 13-17.
- [27] Cho J W, Kim J W, Jung Y G, Goo N S. Electroactive shape-memory polyurethane composites incorporating carbon nanotubes[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2005, 26(5): 412-416.
- [28] Sahoo N G, Jung Y C, Goo N S, Cho J W. Conducting shape memory polyurethane-polypyrrole composites for an electroactive actuator[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2005, 290(11): 1049-1055.
- [29] Mohr R, Kratz K, Weigel T, Lucka-Gabor M, Moneke M, Lendlein A. Initiation of shape-memory effect by inductive heating of magnetic nanoparticles in thermoplastic polymers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(10): 3540-3545.
- [30] Buckley P R, McKinley G H, Wilson T S, Small W, et al. Inductively heated shape memory polymer for the magnetic actuation of medical devices[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2006, 53: 2075-2083.
- [31] Ni Q Q, Ohki T, Iwamoto M. Mechanical property and application of innovative composites based on shape memory polymer[J]. *Repairing Structures Using Composite Wraps*, 2003: 237-246.
- [32] Liu Y J, Lv H B, Ian X, Leng J S, Du S Y. Electro-activate shape memory composites[J]. *Composite Science and Technology*, 2008.
- [33] Abrahamson E R, Lake M S. Shape memory mechanics of an elastic memory composite resin[J]. *Journal Of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003, 14(10): 623-632.
- [34] Everhart M C, Nickerson M C, Hreha R D. High-Temperature reusable shape memory polymer mandrels[C]. *Smart Structures and Materials 2006: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, Proc. of SPIE, 2006: 6171-61710K.
- [35] Francis W H, Lake C D, Schultz M R, Campbell D, Dunn M, Qi H J. Elastic memory composite microbuckling mechanics: closed-form model with empirical correlation[C]. *48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, the 15th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference*, Honolulu, HI, April 23-26, 2007, AIAA 2007-2164: 1-16.
- [36] Robert M, Taylor L, Erik Abrahamson, Rory Barrett, Dana E, Codell, Philip N, Keller. Passive deployment of an EMC boom using radiant energy in thermal vacuum[C]. *48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 23-26 April 2007, Honolulu, Hawaii, AIAA 2007-2269: 1-6.
- [37] Keller P N, Lake M S, Codell D, Barrett R, Taylor R, Schultz M R. Development of elastic memory composite stiffeners for a flexible precision reflector[C]. *47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 1-4 May 2006, Newport, Rhode Island, AIAA 2006-2179: 1-11.

作者简介: 冷劲松(1968-), 男, 博士, 博士生导师, 教育部部长江学者特聘教授, 主要研究方向为智能材料与结构。
通信地址: 黑龙江省哈尔滨市南岗区一匡街2号3011信箱(150080)
电话: (0451)86402328
E-mail: lengjs@hit.edu.cn

Shape Memory Polymers Composites and Their Applications in Deployable Structures

LENG Jin-song, LAN Xin, LIU Yan-ju, DU Shan-yi

(Center for Composites and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: This paper reviews shape memory polymers (SMPs), their composites and the applications in deployable structures. SMPs are a kind of stimulus responsive material, which have a good capability to show a high reversible strain upon external stimulus and can be used in deformable structures. We first introduce the foundations of SMPs and then present the recent advances in particles, chopped fibers and continuous fibers filled SMP composites, where their electroactive properties are emphasized. Subsequently, the applications of SMP composites in deployable structures are discussed in detail, including deployable hinges, tusses and antennas.

Key words: Smart materials and structures; Shape memory polymer; Composite; Deployable structure; Active deformation