

# 形状记忆复合材料的最新研究进展

马 立

(北京卫星制造厂,北京 100094)

**文 摘** 综述了2009年以来国内外在形状记忆复合材料方面的最新研究进展,重点介绍了热致感应型、电致感应型形状记忆复合材料的情况。在热致感应型中,出现了双向记忆复合材料。应用方面,研究人员发现形状记忆复合材料可以应用于复合材料结构的自修复。同时总结了国、内外科研机构在该领域的研究走向,指出了形状记忆复合材料在应用方面遇到的瓶颈问题,并提出对未来发展的建议。

**关键词** 形状记忆复合材料,热致感应型,电致感应型,应用,瓶颈问题

## Recent Progress in Shape Memory Polymer Composites

Ma Li

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

**Abstract** Recent progress in shape memory polymer composite (SMPC) in China and abroad has been reviewed. The emphases are put on thermo-active SMPC (TSMPC) and electro-active SMPC (ESMPC). Two-way shape memory composites have arisen in TSMPC. In the aspect of application, SMPC has been known to be used for self-repairing of composites structure. Research trends in China and abroad have been summarized. Bottleneck problems in application have been pointed out. Meanwhile, suggestions for future development have been given.

**Key words** Shape memory polymer composite (SMPC), Thermo-active, Electro-active, Application, Bottleneck problem

### 0 引言

形状记忆复合材料是指具有初始形状,在一定条件下形变被固定下来后,通过热、电、光、磁、化学等外部条件激励,能够恢复初始形状的一种智能材料。根据激励条件的不同,可分为:热致感应型(TSMPC)、电致感应型(ESMPC)、光致感应型(PSMPC)、磁致感应型(MSMPC)和化学感应型(CSMPC)等。

国外从事形状记忆复合材料研究与应用的国家有:美国、日本、法国、德国等,其中研究水平处于前沿的是美国。在1980年至2008年的近30年时间里,美国的几家公司和航空航天机构开展了大量深入研究,其中最知名的公司包括:Composite Technology Development, Inc. (CTD)、ILC Dover、The Polymer Technology Group, Inc.、Cornerstone Research Group (CRG)和L'Garde。这几家公司先后研制出以环氧<sup>[1-2]</sup>、聚氨酯<sup>[2-3]</sup>、苯乙烯<sup>[4]</sup>、氰酸酯<sup>[1,5]</sup>、聚醚酯<sup>[6]</sup>等热固性、热塑性树脂为主剂的形状记忆树脂。从20世纪90年代后期开始,美国航空航天局喷气动力

实验室(NASA JPL)、美国空军研究实验室(AFRL)等科研机构与这些公司合作开展了形状记忆复合材料的工程应用研究,并取得了很大进展,制造了一些原理样机和工程样机,如:可展开柔性太阳翼<sup>[7-8]</sup>、大型超轻桁架结构<sup>[9]</sup>、天线柔性反射面<sup>[10]</sup>、可变形机翼蒙皮<sup>[11]</sup>等。2006年12月,由美国CTD公司研制的太阳翼铰链机构成功地应用于国际空间站,这是形状记忆复合材料首次空间应用<sup>[12]</sup>。2009年以后,美国在这方面的研究报道很少,日本在此领域的研究成果<sup>[13]</sup>时有发布。

从2005年开始,国内科研机构对形状记忆树脂及其复合材料开展了基础和应用研究,2008年以后,该领域的研究逐渐升温,参与研究的大学和科研机构主要有:哈尔滨工业大学、西北工业大学、北京交通大学、南京理工大学、北京航空材料研究院、同济大学等。但目前国内的研究仍处于实验室范围的材料、原理样机研究阶段,理论研究较少且不深入,距离工程应用还有较大差距。

收稿日期:2013-08-19

作者简介:马立,1973年出生,研究员,研究方向为航天器复合材料结构。E-mail:mali0335@googlemail.com

本文介绍 2009 年以来热致感应型、电致感应型形状记忆复合材料的发展情况。

## 1 材料研究

### 1.1 热致感应型形状记忆复合材料

在各种形状记忆复合材料中,热致感应型是被人们研究最广泛和最深入的。具有形状记忆功能的树脂既有热固性树脂,也有热塑性树脂,以其为基体制成的复合材料也因此分为热固性和热塑性形状记忆复合材料。在常温下,热固性材料呈玻璃态,热塑性材料呈结晶态,受热后都能转变为高弹态。对于热固性形状记忆复合材料,其形状转变温度为  $T_g$  (玻璃化温度);对于热塑性形状记忆复合材料,其形状转变温度为  $T_m$  (融化温度)。目前,已经开发的热塑性形状记忆树脂包括:反式聚戊二烯、丁二烯-苯乙烯共聚物、交联聚乙烯、聚四氟乙烯<sup>[14]</sup>、聚酯酯等;热固性形状记忆树脂包括:苯乙烯、环氧、氰酸酯等。

国外已商品化的形状记忆树脂包括:美国的 Veriflex<sup>®</sup>、TEMBO<sup>®</sup>、Calo. MER<sup>™</sup>,日本的 DiAPLEX<sup>®</sup><sup>[13]</sup>。

国内科研单位有以 Veriflex<sup>®</sup><sup>[15]</sup> 为研究对象的,更多的是研发自己的树脂体系。通常是以 E-44<sup>[16]</sup>、E-51<sup>[17]</sup>、E-54<sup>[18-19]</sup> 等环氧树脂为主剂,添加胺类固化剂合成,其中固化剂含量的变化可改变  $T_g$ 。此外,高军鹏等<sup>[19]</sup> 用热塑性醚类改性环氧树脂获得了  $T_g$  为 150℃ 的形状记忆树脂;王坤、朱大明等<sup>[20]</sup> 用热固性氰酸酯与环氧 E-51 共聚制得耐温型的形状记忆树脂。

国内研究人员除了在热致感应型形状记忆树脂合成方面取得了可喜的成绩外,在复合材料力学性能研究方面也取得了一些成果<sup>[21-22]</sup>。

形状记忆合金(SMA)和液晶弹性体(LCEs)具有双向记忆效应,不需要外界机械驱动即可实现双向形状记忆。然而,绝大多数形状记忆树脂只具有单向记忆功能。近年来,中国和日本的学者发现了具有双向记忆功能的形状记忆复合材料/结构。传统的热致感应型形状记忆复合材料的记忆是单向的、不可逆的,即材料在温度高于转变温度的情况下,受外力发生的形变,只能依靠温度再次升至转变温度以上,在去除

外力束缚的情况下,材料的形状才能恢复至初始状态;而双向记忆功能是指升温过程中材料发生的变形,降温即可恢复至初始形状,形变过程不需外力驱动,也无需再次升温至材料的转变温度以上。

双向记忆功能复合材料由两种具有不同转变温度或不同热变形率的材料组合而成。双向记忆复合材料可以是形状记忆合金(SMA)与形状记忆树脂的复合产物<sup>[23]</sup>,也可以由转变温度不同的两种形状记忆树脂组合而成<sup>[23-24]</sup>。

日本的 Hirohisa Tamagawa<sup>[23]</sup> 将直径约 100  $\mu\text{m}$  的形状记忆金属丝包埋在环氧树脂板中,这种 SMA 丝当温度高于 70℃ 时收缩,温度低于 70℃ 时伸长;环氧树脂板是一种普通的具有一定弹性的板材,在 80℃ 以下其弹性性能不变;另一块板材是形状转变温度  $T_g$  为 30℃ 的形状记忆聚氨酯(SMPU)。他将包埋 SMA 丝的环氧树脂板与 SMPU 用胶黏剂胶接成复合材料。这种复合材料具有双向记忆功能,当温度升到 70℃ 以上时,由于 SMA 丝收缩,材料发生弯曲;温度降至 70℃ 以下,30℃ 以上,材料恢复成初始的平直状态,这是因为 SMA 丝伸长,而包埋它的环氧树脂具有弹性,同时 SMPU 仍处于软化状态;当温度降至 30℃ 以下时,材料的平直状态被固定下来。

香港科技大学的 Shaojun Chen 等<sup>[24]</sup> 将 SMPU 与弹性聚氨酯(PU)胶接成具有双向记忆功能的材料。图 1 是他们制备 SMPU 基形状记忆复合材料的过程示意图。这种复合材料的双向形变过程见图 2。当温度升高时,在 SMPU 回复应力的作用下,复合材料朝 SMPU 方向弯曲,当 SMPU 的回复应力与弹性 PU 的弯曲应力相等时,就达到了高温平衡状态;一旦降温,弯曲的弹性 PU 就像一个反向弹簧,使得复合材料发生反向形变,复合材料最终回复到低温平衡状态。但是,低温平衡状态与原始状态有些许差异。这是因为 SMPU 的弹性力阻碍复合材料的反向形变。不过,从第二个形变周期开始(图 2 是第一个形变周期),复合材料经历升温、降温过程后,能够回复到初始状态,即图 2 中 H 的状态。

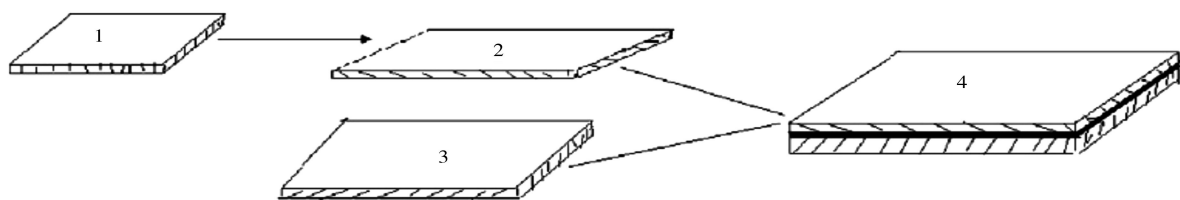


图 1 双向记忆复合材料的制备过程

Fig. 1 Preparing process of two-way memory composite

1 是具有形状记忆功能的聚氨酯薄膜(SMPU);2 是 1 经拉伸变形并将形变固定下来的 SMPU;  
3 是弹性 PU;4 是使用胶黏剂将 2 和 3 胶接而成的复合材料。

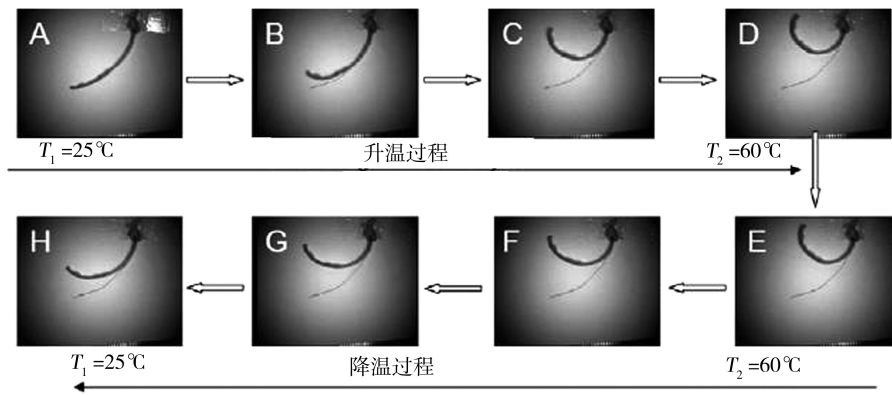


图2 SMPU 基形状记忆复合材料的双向形变过程

Fig. 2 Two-way deforming process of SMPU composite

北京交通大学的王正道等<sup>[17]</sup>利用两种不同  $T_g$  的形状记忆环氧树脂制造了皮芯结构、具有双向记忆功能的复合材料结构,其中“皮”是玻璃化转变温度为  $T_{g1}$  的环氧树脂膜,“芯”是玻璃化转变温度为  $T_{g2}$  的环氧树脂圆柱体,  $T_{g1} > T_{g2}$ 。

### 1.2 电致感应型形状记忆复合材料

相对于热致感应型形状记忆复合材料,电致感应型形状记忆复合材料 (ESMPC) 具有易于控制、可远程驱动、响应速度快等优势。ESMPC 是热致形状记忆树脂与具有导电性能物质 (如炭黑、碳纳米管、短切碳纤维、金属粉末等) 的复合材料,该复合材料通过电流产生的热量使体系温度升高,致使形状回复。因此,既具有导电性能,又具有良好的形状记忆功能。目前,主要有两种方法实现电致驱动,一种是添加导电填料提高材料内部形成导电网络的几率;另一种是磁粉在磁场的作用下定向成链<sup>[25-29]</sup>。

炭黑作为导电填料具有成本低、导电性好、化学稳定、加工简单等优势。炭黑含量的增加使得材料的电阻减小,在一定电压下,炭黑含量的增加有利于复合材料形变的回复,但是当炭黑的含量超过了一定值,随着炭黑含量的继续增加,复合材料的形变回复率降低,这是因为炭黑的增加对形状记忆树脂的链段运动产生了不利影响。兰鑫等<sup>[30]</sup>研究了炭黑填充苯乙烯基形状记忆复合材料,当炭黑含量为 3.8wt% 时,材料具有良好的导电性。

在形状记忆树脂中加入碳纳米管,可以使复合材料获得电致形状记忆效果,同时可以提高材料的力学性能。复合材料的形变回复率随着碳纳米管含量的增加先增大后减小,一般碳纳米管的含量不超过 5wt%。因为碳纳米管有极强的团聚问题,所以含量不宜过高;同时,含量过高,会对形状记忆性能产生不利影响。Jung Yong Chae 等<sup>[31]</sup>用强酸处理后的碳纳米管与聚氨酯的预聚物交联聚合合成 SMPU,具有很好的力学性能,其形变回复率、形变固定率及导电性能

均有所提高。

将短切碳纤维填充进形状记忆树脂,可获得力学性能优异的复合材料,同时碳纤维在树脂内形成导电网络,可大大降低材料的电阻值,而且相对于炭黑等颗粒填料填充的复合材料,电阻值更稳定,不易受环境温度的影响。M. Nishikawa 等<sup>[32]</sup>研究了不同碳纤维含量的 SMPU 复合材料,结果表明:随着短切碳纤维含量的增多,复合材料的形变回复率减慢,参与应变量增大。由于碳纤维具有很高的弹性模量,在纤维填充方向不具有很好的形状记忆功能。为此,在实际应用中一般利用弯曲变形达到驱动碳纤维填充形状记忆复合材料的目的。

除了添加某一种填料外,近年来还出现了几种混合填料填充的形状记忆复合材料。Lu 等<sup>[33]</sup>向形状记忆苯乙烯中添加了炭黑和短切碳纤维,均匀分布在苯乙烯中的炭黑连接可以局部长距离导电的短切碳纤维形成三维导电网络,大大降低了复合材料的电阻率。在炭黑含量一定的情况下,增加短切碳纤维的含量对复合材料的记忆功能会产生不利影响。他们还发现,相比于颗粒填料,短切碳纤维的加入明显提高了复合材料的力学性能;5wt% 炭黑和 2wt% 短切碳纤维填充的苯乙烯基形状记忆复合材料具有感应外界温度变化和应变的能力;当含量在 0 ~ 2wt% 时,随着短切碳纤维含量的增加,复合材料的形状回复应力增加。Lu 等<sup>[28]</sup>得出结论,由炭黑和短切碳纤维填充的形状记忆复合材料同时具有感应和驱动的能力。

### 2 应用研究

20 世纪 70 年代末到 80 年代初,美国 RDI 公司将交联聚烯烃类形状记忆聚合物商品化,广泛应用于电线电缆、化工管道的接续与防护。目前,聚烯烃、聚氨酯、聚酯类的形状记忆聚合物应用最广泛,应用于纺织、医学、汽车、电子、化工、玩具等领域。航空航天领域将形状记忆复合材料用于展开结构<sup>[7-12]</sup>。近年来,人们又发现它可用于材料/结构的自修复。

## 2.1 展开结构

哈尔滨工业大学以 Veriflex<sup>®</sup> 为基体、T300 碳纤维织物为增强材料制备了具有形状记忆功能的铰链<sup>[15]</sup>, 此后, 研究人员将该铰链装配到太阳翼模型上, 经过 120 s 的热致驱动实现了太阳翼的 90° 展开<sup>[34]</sup>, 图 3 显示了太阳翼模型展开的过程。

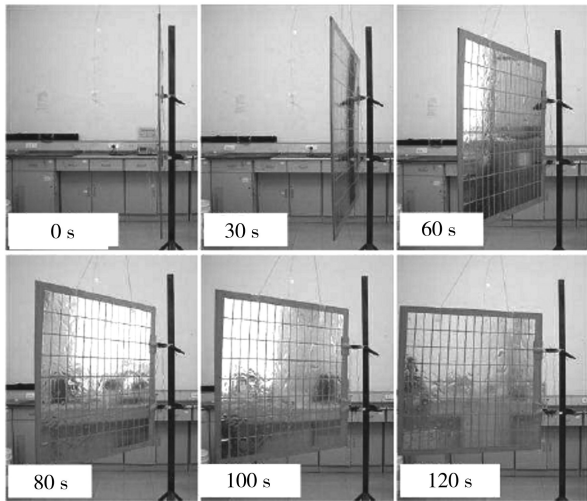


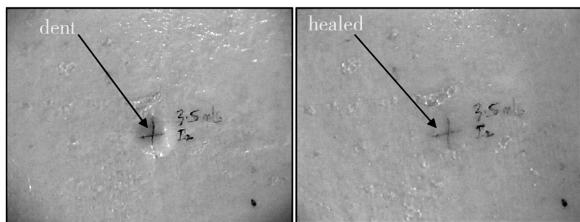
图 3 SMPC 铰链驱动太阳翼模型的展开过程

Fig.3 Deploying process of solar wing model actuated by SMPC hinges

同济大学的李文晓与上海宇航系统工程研究所的房光强等<sup>[35]</sup>制备了  $T_g$  为 94℃ 的碳/环氧形状记忆复合材料片材, 8 次循环后材料的形状回复率保持在 97% 以上。

## 2.2 材料/结构自修复

Guoqiang Li 等<sup>[36]</sup>使用 Veriflex<sup>®</sup> 浸渍并固化成型了 3D 机织夹层结构, 当温度升至  $T_g$  以上时, 赋予该结构 5% 的压缩形变, 然后保持压力降温至室温。以此方法制备的 3D 机织夹层结构在受到冲击载荷时出现凹坑[如图 4(a) 所示], 其自修复的方法是: 升温至  $T_g$  以上, 同时结构的上下表面用外力束缚住, 此时依靠 Veriflex<sup>®</sup> 的形状记忆功能, 压缩形变只能在凹坑区域得以回复, 然后保持束缚状态, 降温至室温, 去除外力, 至此, 凹坑得以修复。图 4(b) 显示了结构修复后的状态。



(a) 修复前的凹坑 (b) 修复后凹坑消失

图 4 冲击损伤修复前后的状态

Fig.4 Status before and after self-repairing

2011 年, 美国 CRG 公司的制备及使用形状记忆复合材料补片的方法获得美国专利<sup>[37]</sup>。他们利用

具有形状记忆功能的复合材料片材作为补片, 来修复受损的复合材料结构。

## 3 建议

2009 年前, 国外尤其是美国在这方面的基础和应用研究方兴未艾, 尤其是一些高技术公司与美国军方合作, 研制了很多空间展开结构, 并进行了大量的地面试验; 但此后的 4 年多时间里, 美国的研究与应用迅速降温。与之情况相反的是, 国内大概自 2008 年开始, 该领域逐渐成为研究热点, 诸多高校、研究所介入。

形状记忆复合材料按照增强材料不同可分为颗粒增强型、短纤维增强型和连续纤维增强型三类, 其中颗粒填充和短纤维增强的形状记忆复合材料由于力学性能较差, 一般仅用于功能材料; 而连续纤维增强的形状记忆复合材料由于力学性能佳可以作为结构-功能一体化材料。

任何材料都有其优势和劣势, 连续纤维增强的形状记忆复合材料虽然力学性能好, 可用于承力结构, 但由于复合材料的形状记忆功能是其的形状记忆树脂提供的, 因此, 随着纤维体积分数的提高, 复合材料的形状固定率和回复率会降低。为了实现形状记忆功能并达到所需的形状回复率, 势必要降低连续纤维的含量, 由此带来的弊端是复合材料力学性能的降低, 从而影响结构的承载能力。因此, 形状记忆复合材料的结构承载和记忆功能是相互制约的, 是此消彼长的关系。这从美国的一些研究报告中也可窥一斑, Craig S. Hazelton 等<sup>[38]</sup>发现, 纤维体积分数在 0.35% ~ 0.40% 内, 复合材料在弯曲变形过程中纤维才不易损伤, 这种低纤维体积分数的复合材料结构更容易收拢成更小的体积。同时, 这种形状记忆复合材料的厚度也不宜厚, 否则由于碳纤维的强度、刚度很大, 会给弯曲变形带来困难, 其所在 CTD 公司研制的 7 m 长可展收梁的壁厚只有 0.6 mm。

另外, 从制备形状记忆复合材料到制造结构, 还有很多工作要做, 了解材料的特性是基础, 结构设计要根据材料的特性设计出合理的结构形式, 以实现结构的收拢与展开。例如, 不能设计成封闭结构、壁厚不能厚等, 否则, 由于连续碳纤维的刚性很强而阻碍结构的变形, 甚至不能达到展开、收拢的预期效果。以美国 CTD 公司的可展开桁架结构为例, 他们研制了以 TEMBO<sup>®</sup> 为基体的形状记忆复合材料梁及桁架结构, 如图 5 所示<sup>[39]</sup>。其中的形状记忆梁不是传统的圆形或矩形截面, 而是设计为非封闭的“豆荚”状, 并研究、验证了三种截面形状(图 6), 详细设计参数见表 1。由此可见, 在结构设计方面, 针对形状记忆复合材料的特点, 有很多细节需要考虑, 除了结构形

式、壁厚,还有弯曲半径不能过小,否则,在弯曲变形过程中,纤维会从基体中脱出甚至断裂,这将极大地

降低结构力学性能。

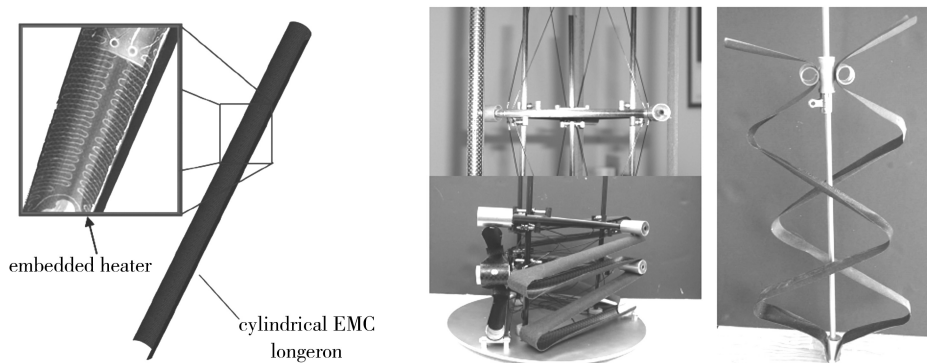


图5 “豆荚”形状记忆梁及其桁架  
Fig.5 Pod-shape SMPC boom and truss

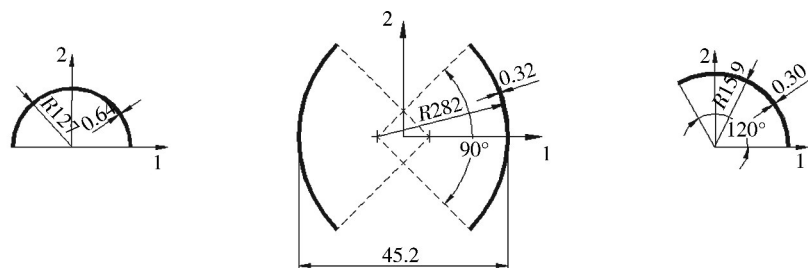


图6 三种“豆荚”状梁的截面图

Fig.6 Three sections of pod-shape boom

表1 “豆荚”形状记忆梁的设计参数

Tab.1 Design parameters of pod-shape SMPC boom

圆周角/(°)	弯曲半径/mm	壁厚/mm
180	12.7	0.64
90	28.2	0.32
120	15.9	0.30

这种“豆荚”状梁的桁架结构是CTD公司为美国FalconSat-3微小卫星研制的重力梯度杆,其工程样机通过了模样阶段的地面试验,但最终没能应用。从2008年美国空军研究院William W. Saylor的报告<sup>[40]</sup>可以得知,未应用的原因是结构超重、体积大、交货迟。

综上所述,尽管美国在形状记忆复合材料领域研究了逾30年,水平处于世界领先地位,但在航空航天展开结构方面的工程应用仍凤毛麟角,尤其是近几年,美国在该领域的研究、应用处于停滞状态,说明该技术发展遇到了瓶颈。可能有三方面的制约因素:(1)结构承载与形状记忆功能之间的矛盾;(2)结构的体积收拢压缩比不理想;(3)展开收拢的辅助装置结构复杂、质量较大。

国内在形状记忆复合材料方面的研究起步较晚,近年来在材料的合成方面取得了较大进展;但在形状记忆机理、力学性能、驱动控制、微观变形等方面的研究还有待深入;形状记忆复合材料结构的设计和研制宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013年 第5期

还处于模仿、学习阶段。我们可以借鉴美国、日本等的研究成果,扬长避短,采用产学研相结合的方式,开辟新的应用领域,使形状记忆复合材料尽早应用、服务于人们的生产、生活。

### 参考文献

- [1] Abrahamson Erik R, Lake Mark S, Munshi Naseem A. Shape memory polymers for elastic memory composites[R]. 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA 2002-1562:1-11
- [2] Scarborough Stephen E, Cadogan David P. Applications of inflatable rigidizable structures[C]. Sampe '06 Conference Proceedings, 2006,51:1-15
- [3] Koorosh Guidanean, Williams G T. An inflatable rigidizable truss structure with complex joints[R]. AIAA-98-2105:2797-2806
- [4] Koury Andrew. Composite tooling reusable mandrels[J]. SAMPE Journal, 2005,41(4):36-39
- [5] Schueler Robert M, Pora Emil J, et al. Veritex™ struts for antenna applications[R]. 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference, 2006, AIAA 2006-2038
- [6] Hampikian Janet M, Heaton Brian C, Tong Frank C, et al. Mechanical and radiographic properties of a shape memory polymer composite for intracranial aneurysm coils[J]. Materials Science and Engineering C, 2006,26: 1373-1379
- [7] Redell Frederick H, Lichodziejewski David. Power-

- scalable inflation-deployed solar arrays [R]. 45<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2004, AIAA 2004-1572
- [8] Campbell Douglas, Barrett Rory, Lake Mark S, et al. Development of a novel, passively deployed solar array [R]. 47<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2006, AIAA 2006-2080
- [9] Lin John K, Watson Judith J, Jones Thomas W. Ultra lightweight isogrid boom space experiment (Ultra Boom<sup>TM</sup>) systems design [R]. 46<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2005, AIAA 2005-1971
- [10] IM Eastwood, Thomson Mark, Fang Houfei. Prospects of large deployable reflector antennas for a new generation of geostationary doppler weather radar satellites [R]. AIAA Space 2007 Conference & Exposition, 2007, AIAA 2007-9917
- [11] Etches J, Thill C, Bond I, et al. Morphing skins [J]. The Aeronautical Journal, 2008(3):3216
- [12] Barrett Rory, Taylor Robert, et al. Design of a solar array to meet the standard bus specification for operation responsive space [R]. 48<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 2007, AIAA 2007-2332
- [13] Gao Fei, Son Seyul, Park Kyungmook, et al. On a novel self-regulating shape memory polymer composite [C]. Proc. of SPIE, 2011, 7978:797816
- [14] 宋心琦. 有形状记忆功能的高分子材料 [J]. 化学教学, 2011(11):3-5
- [15] Lan Xin, Liu Yanju, Lv Haibao, et al. Fiber reinforced shape-memory polymer composite and its application in a deployable hinge [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18: 024002
- [16] 张瑶. 基于形状记忆复合材料的自展开结构若干问题研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2010
- [17] Wang Zhengdao, Song Weibin, Ke Liaoliang, et al. Shape memory polymer composite structures with two-way shape memory effects [J]. Materials Letters, 2012, 89: 216-218
- [18] 何先成, 高军鹏, 邓华, 等. 一种形状记忆环氧树脂体系的制备与性能研究 [J]. 材料工程, 2010(增刊1):100-103
- [19] 高军鹏, 张晨乾, 安学锋等. 含氟聚醚醚酮改性环氧树脂的形状记忆性质研究 [J]. 材料工程, 2009(增刊2): 123-126
- [20] 王坤, 朱光明. 氰酸酯/环氧树脂体系的形状记忆效应研究 [J]. 中国胶黏剂, 2012, 21(3): 13-16
- [21] Ahmad M, Singh D, Fu Y Q, et al. Stability and deterioration of a shape memory polymer fabric composite under thermomechanical stress [J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96:1470-1477
- [22] Chen Yijin, Sun Jian, Liu Yanju, et al. Variable stiffness property study on shape memory polymer composite tube [J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21: 094021
- [23] Hirohisa Tamagawa. Design and processing of shape memory polymer (SMP)/shape memory alloy (SMA) composites [R]. Gifu University, Japan, 2010
- [24] Chen Shaojun, Hu Jinlian, Zhuo Haitao. Properties and mechanism of two-way shape memory polyurethane composites [J]. Composites Science and Technology, 2010, 70: 1437-1443
- [25] Liu Yanju, Lv Haibao, Lan Xin, et al. Review of electro-active shape-memory polymer composite [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69: 2064-2068
- [26] 冷劲松, 兰鑫, 刘彦菊, 等. 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 [J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 950-956
- [27] Madbouly Samy A., Lendlein Andreas. Shape-memory polymer composites [J]. Adv. Polym. Sci., 2010, 226: 41-95
- [28] Lu Haibao, Yu Kai, Liu Yanju, et al. Sensing and actuating capabilities of a shape memory polymer composite integrated with hybrid filler [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19: 065014
- [29] 魏堃, 朱光明, 唐玉生. 电致型形状记忆聚合物复合材料的研究进展 [J]. 材料导报 A: 综述篇, 2011, 25(4): 9-12
- [30] Lan Xin, Liu Yanju, Leng Jinsong. Thermoset shape-memory polymer nanocomposite filled with nanocarbon powders [C]. Proc. of SPIE, 2009, 7493: 749340
- [31] Yong Chae Jung, Hye Jin Yoo, Yoong Ahm Kim, et al. Electroactive shape memory performance of polyurethane composite having homogeneously dispersed and covalently crosslinked carbon nanotubes [J]. Carbon, 2010, 48 (5): 1598
- [32] Nishikawa M, Wakatsuki K, Takeda N. Thermomechanical experiment and analysis on shape recovery properties of shape memory polymer influenced by fiber reinforcement [J]. J. Mater. Sci., 2010, 45(14): 3957
- [33] Lu Haibao, Yu Kai, Sun Shouhua, et al. Mechanical and shape-memory behavior of shape-memory polymer composites with hybrid fillers [J]. Polym. Int., 2010, 59 (6): 766
- [34] Lan Xin, Zhang Ruirui, Liu Yanju, et al. Fiber reinforced shape-memory polymer composite and its application in deployable hinge in space [R]. AIAA 2011-2115
- [35] 房光强, 李文晓, 彭福军. 基于形状记忆复合材料的空间可展桁架结构研究 [J]. 材料工程, 2008(增刊1): 375-378
- [36] Nji Jones, Li Guoqiang. A self-healing 3D woven fabric reinforced shape memory polymer composite for impact mitigation [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19: 035007
- [37] Hood P J, Bellbrook O H. Method of making and using shape memory polymer composite patches [P]. US, 7,938, 923 B2, 2011-05-10
- [38] Hazelton Craig S, Gall Keith R, Abrahamson Erik R, et al. Development of a prototype elastic memory composite STEM for large space structures [R]. AIAA 2003-1977
- [39] Keller Philip N, Lake Mark S, Francis Will, et al. Development of a deployable boom for microsattellites using elastic memory composite material [R]. AIAA 2004-1603
- [40] Saylor William W P E, France Col Martin E B. Test and on-orbit experiences of falconsat-3 [R]. ESA SP-660, 2008

(编辑 李洪泉)