

形状记忆聚合物复合材料在空间可展结构中的应用研究

赵伟^{1,2}, 刘立武¹, 兰鑫², 刘彦菊^{2*}, 冷劲松²

(1. 哈尔滨工业大学航天学院航天科学与力学系, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080)

摘要:传统的机械式可展开结构往往存在机械结构较复杂、质量较大、展开过程易产生振动的缺点,而形状记忆聚合物复合材料具有低成本、低密度、比强度大、展开过程平缓、振动小的特点,这些特点使其成为解决空间可展开结构现在面临问题的一种可能手段。介绍了基于形状记忆聚合物复合材料的空间可展开结构的发展近况,其结构简单、振动小等特点有望使其在未来的航天领域得到更多的应用。

关键词:形状记忆复合材料; 空间可展开结构; 应用研究

中图分类号: V45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825(2016)05-0594-08

DOI:10.16329/j.cnki.zrht.2016.05.010

Study on Application of Shape-memory Polymer Composites in Space Deployable Structures

ZHAO Wei¹, LIU Liwu¹, LAN Xin², LIU Yanju^{2*}, LENG Jinsong²

(1. Department of Astronautic Science and Mechanics, Harbin Institute of Technology (HIT), Harbin 150001;

2. Center for Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology (HIT), Harbin 150080)

Abstract: Traditional mechanical deployable structures usually have such drawbacks as the complex configuration, the large mass, and the inevitable vibration during deployment. However, shape memory polymer composites possess many advantages like low cost, low density, high strength-weight ratio, steady recovery process, and small vibration, which provides possible solutions to the problems that current deployable structures are facing. In this paper, the recent advances of deployable structure based on shape memory polymer composites were presented. Considering the simple configuration and small vibration, the shape memory polymer composites are expected to have more applications in space in the near future.

Key words: shape-memory polymer composites; deployable structures; application research

1 引言

传统的空间可展开结构正从机械式结构,逐渐向重量轻、可靠性高、成本低新型可展开结构发展。而形状记忆聚合物(Shape Memory Polymer, SMPs)作为一种新型的智能材料,与传统机械式结构相比,具有密度低,高弹性应变,低成本等特点,已逐渐成为研究热点。

形状记忆聚合物是一种通过对其进行分子组

合和改性后,形状可随外界条件发生改变的新型材料^[1-3]。具体而言,形状记忆聚合物在高温、电磁、光照、酸碱度等条件下,被赋予一定的初始形状;当外部条件变化时,可相应地改变初始形状并将之固定使其处于变形态;如果外部环境以特定的方式和规律再次发生改变时,变形态的材料能可逆地恢复至起始态形状^[4-5],从而完成了一个“记忆起始态—固定变形态—恢复起始态”的变形循环(如图1)。

收稿日期: 2015-09-06; 修回日期: 2016-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(11225211, 11272106)

作者简介: 赵伟(1991-),男,博士研究生,研究方向为智能材料和结构。E-mail: chevalier_zw@163.com

* 通讯作者: 刘彦菊(1972-),女,教授,博士生导师,研究方向为智能复合材料和结构。E-mail: yj_liu@hit.edu.cn



图 1 形状记忆聚合物回复过程^[1]
Fig.1 Recovery process of SMP^[1]

形状记忆聚合物可回复应变大,但材料的模量、强度等力学和热-力学性能较差,这些缺点影响了其应用,特别是在航天器上的应用。通过形状记忆材料制造复合材料,能够较好地克服上述缺陷。基于形状记忆聚合物的复合材料具有可回复应变大,变形回复输出力较大、低密度、高刚度、高强度和低成本等优点^[6]。

近三四十年来,随着航天科技的发展,出现了一种新型结构——基于形状记忆聚合物复合材料的空间可展开结构,一些元件已经完成原理性演示验证,并已初步获得应用。形状记忆复合材料由于其轻质、高强度、高模量的特点,可以大幅提高航天器的运载能力,提升人类对太空探索的能力^[7]。与此同时,智能材料与结构(Smart Materials and Structures)作为一门多学科交叉的前沿综合学科^[8],集传感、作动和控制于一身,使结构不仅具有普通材料所有的承载功能,还具有特定的感知和响应功能,而形状记忆聚合物复合材料作为一种主动大变形材料则是其研究的热点之一。目前的研究和应用主要包括空间可展开铰链、空间可展开桁架、空间可展开天线、空间可展开框架结构以及释放机构等,本文将分别从这几个方面介绍国内外的研究与应用情况。

2 形状记忆复合材料空间可展开铰链

铰链通常被用作大部分空间可展开结构的驱动装置。传统的铰链是由金属材料制造的,称为“机械铰链”。然而复杂的集成系统和控制系统明显增加了铰链不能正常工作的可能性^[9]。针对这个问题,Vyvan 首先采用金属材料设计并研发了片层状的弹簧铰链,实验结果表明该铰链能够有效地减少系统的复杂性,然而弹簧铰链展开会产生振动^[10]。基于形状记忆聚合物复合材料

良好的形状固定性能和形状回复性能,以及碳纤维复合材料高刚度、高强度、质量轻的特点,Chiappetta 等用碳纤维增强复合材料代替金属材料作片层,制备了复合材料铰链,用以减轻弹簧铰链展开过程中所带来的振动^[11]。Pellegrino 分析了弹簧片层在相同和相反两种方向弯曲的情况下弯矩与弯曲角之间的关系,结果表明片层在反方向上具有更大的承受载荷的能力,更适合驱动空间结构的展开,然而片层结构存在展开过程中振动偏大的问题^[12]。经历了一系列的设计和改进,基于形状记忆聚合物复合材料的铰链被研发出来,代替了传统的复合材料铰链,减少了因铰链展开所产生的振动。早期的基于形状记忆聚合物的铰链如图 2 所示^[13]。



图 2 形状记忆聚合物复合材料铰链初始设计方案^[13]
Fig.2 The initial design of EMC hinge^[13]

早期对形状记忆聚合物复合材料铰链研究仅仅是基本的研究,多集中于用形状记忆聚合物复合材料铰链解决空间可展开铰链的自锁与自驱动问题,构造比较简单,且没有连接运动部件。然而基于形状记忆聚合物复合材料的铰链具有更大的设计和应用空间。美国 CTD 公司的 Francis 等设计了两个半圆状背对的铰链片层结构式的新型铰链,如图 3 所示,通过加热嵌入到片层中的电阻元件产生焦耳热来驱动交联结构的展开是最理想的方式^[13]。

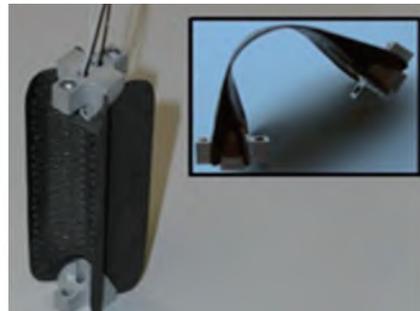


图 3 CTD 公司合成的形状记忆复合材料铰链^[13]
Fig.3 EMC hinge fabricated by CTD company^[13]

哈尔滨工业大学的冷劲松等制备了环氧基形状记忆聚合物以及复合材料,设计并制备了基于形状记忆聚合物复合材料的铰链,图4为该铰链的分拆部件图,图5为碳纤维增强的形状记忆聚合物复合材料铰链。该铰链由两个背对的形状记忆聚合物复合材料弯曲片层末端固定而成。该片层的程度为100 mm,厚度为2.5 mm,中心圆半径为12.5 mm,弯曲角度为120°。该铰链由三层碳纤维编织材料铺设而成,铰链由锁定状态展开时只需加热贴附于片层凹面的电热膜,通过电热驱动形状记忆聚合物铰链的展开^[1,14]。与CTD公司研发的复合材料铰链相比,这种类型的形状记忆聚合物铰链不容易出现脱粘现象^[1]。在自研的展开滑动平台上试验的结果表明,此铰链能在回复率接近100%的前提下有效降低结构的振动效应^[15-16]。

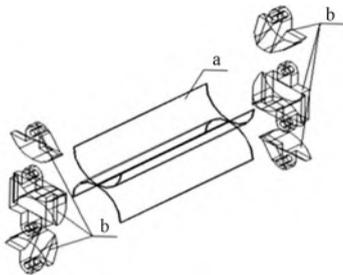


图4 形状记忆复合材料铰链的弧形片层^[14]
Fig. 4 The curved carbon-fiber reinforced SMP composite shell^[14]

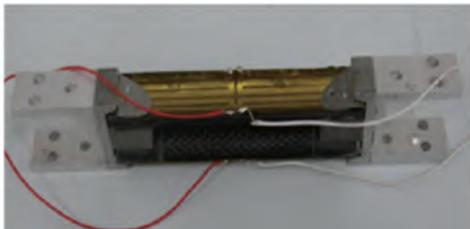


图5 形状记忆聚合物复合材料铰链^[1]
Fig. 5 Shape memory polymer composite hinge^[1]

3 空间可展开桁架结构

空间可展开桁架结构是一种重要的空间支撑结构,在航天领域有着广泛的应用。图6为俄罗斯Georgian公司针对中等口径展开机构设计的一种剪叉式可展开天线EGS,该天线由桁架作为支撑结构,具有较大的折展比和较轻的质量。天线机构的外层可展开环形桁架由剪叉机构组成,使

用辐射状的张拉膜肋连接外层支撑桁架与中央轮毂,实现整个天线机构刚度的提升^[17]。

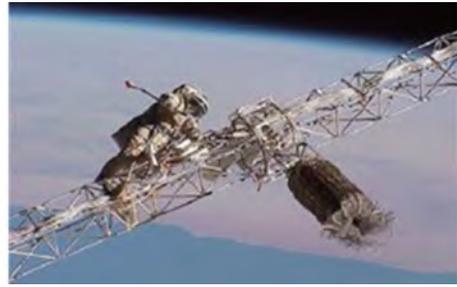


图6 典型桁架式空间可展开机构^[17]
Fig. 6 The typical truss deployable structure^[17]

近些年,随着智能材料与结构技术的快速发展,形状记忆复合材料开始应用于空间可展开梁,能够实现展开和锁定的一体化。展开方式靠材料的驱动力,锁定方式为自然冷却恢复初始大刚度,而且还避免了展开过程中所产生的振动。与常规材料相比,形状记忆聚合物复合材料有着增强结构性能的潜力,并且提高了经济性,减少了安全隐患^[18]。

为了满足美国空军学院FalconSat-3微小型卫星的需求,美国CTD公司设计了一些机械构造简单,轻质、高效的形状记忆聚合物复合材料可展开桁架^[18]。其中一种设计已经被应用于支撑该卫星上的微动力目标控制系统如图7所示分别为该结构的折叠状态和展开状态。



图7 三翼梁式可展开桁架的折叠状态和展开状态^[18]
Fig. 7 Three-longeron SMPC in both packaged and deployed states^[18]

哈尔滨工业大学冷劲松等研发了一种使用环氧基形状记忆聚合物复合材料片层的三翼梁可展开桁架(如图8)^[19],结构较大而质量较轻,可用于大口径空间可展开反射面。

为更好地控制展开速率以限制片层振动,并为整个结构提供支撑力以获得较大刚度,ILC Dover公司的L. Shook等将弹簧钢和形状记忆聚合物复合材料管制成可展开桁架,如图9所示^[20]。该结构集合了弹簧钢和形状记忆聚合物



图 8 三翼梁桁架结构^[19]
Fig. 8 Three-longeron truss structures^[19]

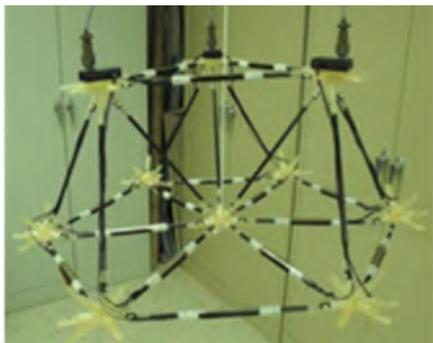


图 9 四面体桁架结构^[20]
Fig. 9 The structure of tetrahedral truss^[20]

复合材料的优势,具有轻质、结构简单等特点。

4 可展开天线结构

空间可展开天线有两个重要的指标:天线的孔径大小和展开精度。然而,这两个参数之间通常存在着矛盾,如果两个参数都满足的话,结构有可能会更加复杂,并且设计的同时还需要考虑质量和收缩体积^[9, 21]。针对这个问题,研究者提出了许多结构模型的概念,然而这些概念都有着质量、展开大小以及表面精度的问题^[9]。而作为理想的先进材料,形状记忆聚合物复合材料有望克服这些缺陷,在空间可展开天线方面发挥越来越重要的作用^[9]。

20 世纪 70 年代,NASA 的 JPL 与洛克希德公司联合研制了缠绕肋可展开天线(如图 10)^[22]。这种伞状天线主要有中心轮毂,抛物线状碳纤维肋和反射网面组成。收拢时,缠绕肋被绳索固定在中心轮毂上,展开时,绳索被剪断,肋在弹性势

能作用下恢复自身的初始状态。该缠绕肋可展开天线的展开可靠性高,收纳率大,可适合做较大口径的展开天线,但存在着形面精度和刚度均较低的缺陷。



图 10 金属网面可展开天线^[22]
Fig. 10 The deployable antenna based on mesh reflector^[22]

美国 Harris 利用形状记忆聚合物复合材料针对柔性精度反射面的概念与 CTD 公司联合研发的一种用于卫星通信的大口径高频反射器,该结构由由薄复合材料反射面和形状记忆聚合物加强筋以及支撑结构组成(如图 11),通过对收缩状态下的结构施加热或者光刺激,该结构就有折叠状态展开^[23]。

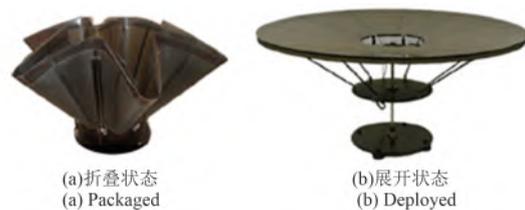


图 11 空间反射面模型^[23]
Fig. 11 Breadboard model^[23]

在国内,哈尔滨工业大学的冷劲松等研发了一种新型的网面可展开天线结构(如图 12),有 6 个环氧基复合材料片层通过 6 个接头连接,由 6 个导向肋控制着展开形状和刚性支架支撑,并使得该结构在展开的过程中保持稳定^[24]。该结构展开和收缩状态的体积比高于 2:1,形状回复率高于 95%,能够使反射面在发射的过程中处于收缩状态,到达轨道后展开^[24]。

基于形状记忆聚合物复合材料铰链作为驱动装置的天线结构,具有展开收缩体积比大,展开刚度大,结构稳定性高的特点^[24]。哈尔滨工业大学的彭宁等结合现有的天线结构,提出一种平面式

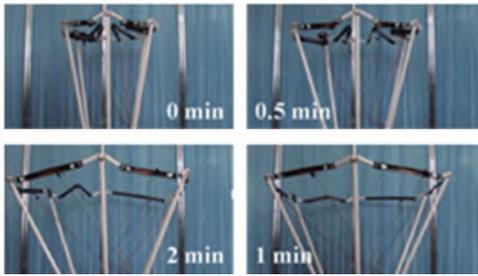


图12 基于形状记忆聚合物复合材料可展开天线的展开过程^[24]

Fig. 12 The deploying process of space deployable mesh-surface antenna model based on shape memory polymer^[24]

空间可展开天线(如图13),结构可以由任意多的单板构成,每两块板之间通过形状记忆聚合物复合材料铰链连接。通过对形状记忆复合材料铰链依次加热,天线结构可由内至外有序展开,使展开过程中产生的振动和冲击达到最小值。天线收纳比高,兼具较高展开精度^[25]。

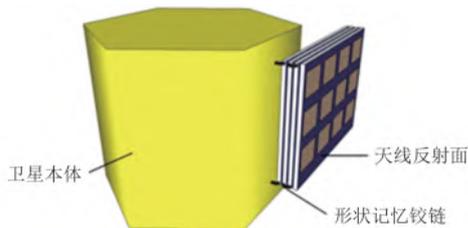


图13 天线收拢状态示意图^[25]

Fig. 13 Diagram of connect of antenna of the collapsed state^[25]

5 空间可展开框架结构

自从人类开始探索太空,智能空间可展开结构已经被用于许多空间任务。与传统的空间可展开结构相比,智能空间可展开结构节省了大量的空间,并且质量轻。与传统的机械式展开结构相比,智能空间可展开结构结构简单,因此与机械系统相比,其可靠性更高^[26]。

如图14所示充气式空间居住舱,其表面为薄膜材料,展开直径为7.6 m,长为9.1 m^[27]。

美国ILC Dover公司与NASA的Langley研究中心合作设计并制备了采用形状记忆聚合物复合材料的充气可展开月球居住站,在以较小体积发射到月球后充气展开,实现了以较小发射体积获得较大使用空间的目的^[28-29]。图15为该月球居住站在地面试验中的展开过程。



图14 充气式空间居住舱^[27]

Fig. 14 The inflatable habitation module^[27]

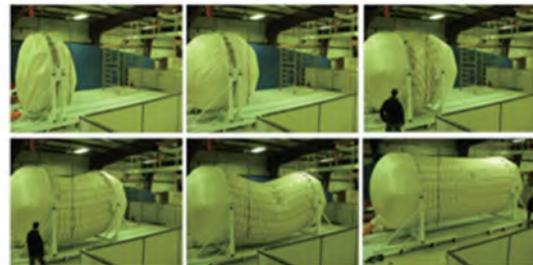


图15 基于形状记忆聚合物复合材料的月球居住站展开过程^[29]

Fig. 15 The process of deployment of accommodation based on shape memory polymer composites^[29]

与此同时,哈尔滨工业大学冷劲松等对基于形状记忆聚合物的居住舱框架结构也进行了研究^[30]。该框架结构由多个三翼式桁架和立方体框架单元组成,其中每个立方体框架单元代表一个舱位,该月球居住舱框架结构可实现单向或多向同时展开,各向三翼式桁架可实现三翼式片层单元逐级展开或同步展开,图16为月球舱整体结构示意图。

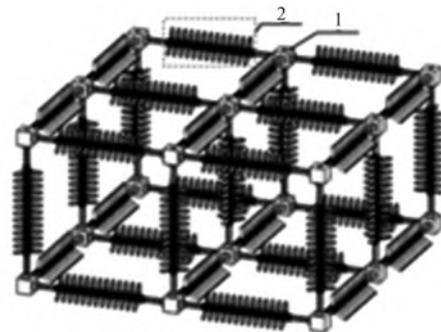


图16 月球舱整体结构示意图^[30]

Fig. 16 Diagram of the whole structure of Lunar module^[30]

该框架式可展开结构其展开环境可有两种:在月球地表展开或在飞船展开,降落至月表。

图 17 框架式空间可展开结构各个方向的展开过程。

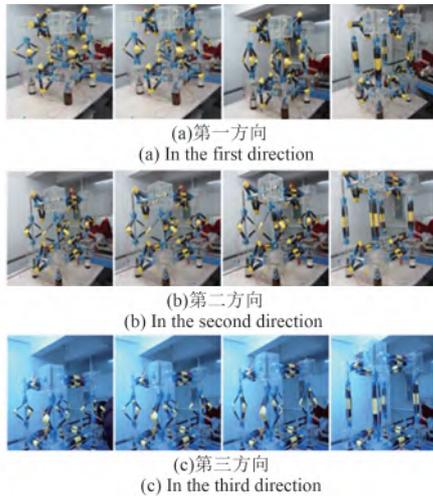


图 17 框架式空间可展开结构各个方向的展开过程^[30]
 Fig. 17 The deployment process of the frame-type space deployable structure^[30]

6 基于形状记忆聚合物的释放机构

传统航天器的连接分离装置机构多采用爆炸螺栓或解锁螺栓(如图 18),但前者存在分离时的冲击非常大,难以实现分离力的准确控制等问题,后者存在一般只适用于连接载荷较小,小部件之间的连接分离^[31]。形状记忆聚合物复合材料的应用为改善这些不足的提供了可能。哈尔滨工业大学的冷劲松等研究了几种不同的基于形状记忆聚合物复合材料的释放结构,可以解决爆炸螺栓存在的冲击力大、不稳定性等问题,以及解锁螺栓适用范围小的问题^[31]。

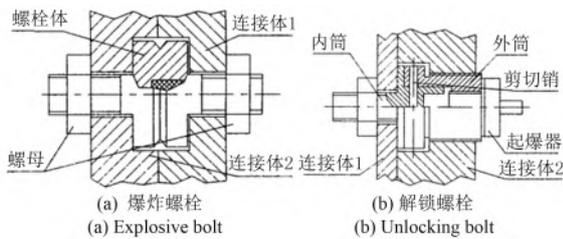


图 18 传统航天器的解锁释放机构^[31]
 Fig. 18 The releasing mechanism of early spacecraft^[31]

哈尔滨工业大学的冷劲松等研究了基于形状记忆聚合物复合材料的智能解锁释放机构。如图 19 为八角形智能扭转释放机构。该装置具有结构简单,工作可靠,解锁冲击小等特点^[32]。

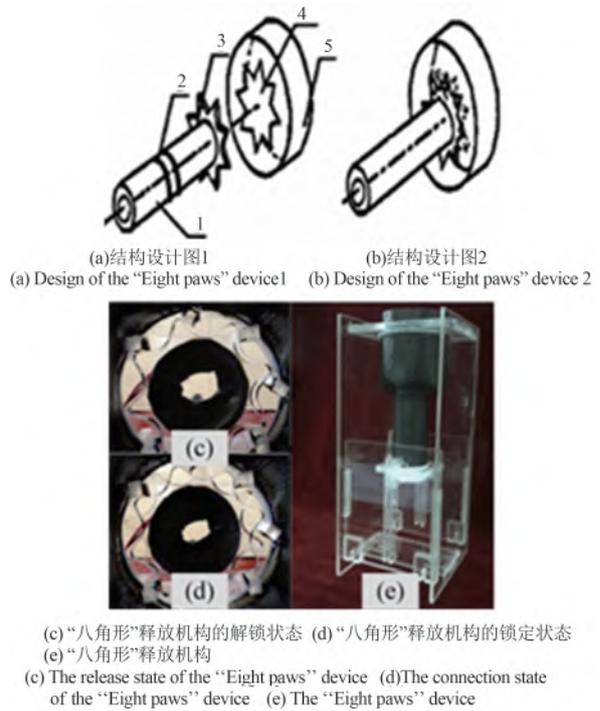


图 19 基于形状记忆聚合物的八角形智能扭转释放机构^[32]
 Fig. 19 Design of the cylinders in the “Eight paws” device based on shape memory polymer^[32]

此外,冷劲松等还研制了基于形状记忆聚合物复合材料的“莲花”型智能释放机构(图 20),该结构制造工艺同样简单,在解锁过程中能够实现平稳的解锁,可靠性高^[32]。

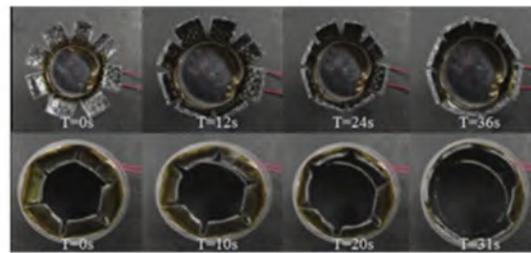


图 20 “莲花”型释放机构模型解锁示意图^[32]
 Fig. 20 Bending recovery tests of the inner and outer cylinder in the “lotus” device^[32]

此外,为了满足大承载释放机构的需求,冷劲松等采用高强度的形状记忆聚合物材料,借助纤维缠绕技术,制备了大承载压缩型复合材料释放机构(图 21),解锁过程中能够完全恢复到初始的圆筒形状,实现平稳解锁,并且具有大承载的能力^[30]。



图21 基于形状记忆聚合物复合材料的释放机构解锁过程^[29]

Fig. 21 The process of releasing process of releasing mechanism based on shape memory polymer^[29]

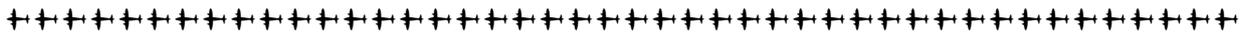
7 结论

作为一种智能材料,形状记忆聚合物复合材料因其轻质、高强度、高模量、变刚度且能主动变形的特点,在航空航天领域受到越来越多的重视。本文综述了形状记忆聚合物复合材料在空间可展开结构中的设计和研发,其中包括空间可展开铰链、空间可展开桁架、空间可展开天线、空间可展开框架结构以及释放机构。考虑到形状记忆聚合物复合材料独特的优势,如低成本,构造简单,易成型等特点,在不久的将来,形状记忆聚合物复合材料有望在航天领域有着更大的应用潜力。

参考文献(References)

- [1] Leng J S, Lan X, Liu Y J, et al. Shape-memory polymers and their composites: stimulus methods and applications[J]. *Progress in Materials Science*, 2011, 56(7): 1077-1135.
- [2] Huang W M, Yang B, Zhao Y, et al. Thermo-moisture responsive polyurethane shape-memory polymer and composites: a review[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, 20(17): 3367-3381.
- [3] Lendlein A, Langer R. Biodegradable, elastic shape-memory polymers for potential biomedical applications[J]. *Science*, 2002, 296(5573): 1673-1676.
- [4] Ratna D, Karger-Kocsis J. Recent advances in shape memory polymers and composites: a review[J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(1): 254-269.
- [5] 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(4): 1616-1637.
- [6] Behl M, Lendlein A. Actively moving polymers[J]. *Soft Matter*, 2007, 3(1): 58-67.
- [7] 岳建如. 空间可动结构设计与控制分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
Yue J R. Analysis of the Design and control of the space Movable Structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. (in Chinese)
- [8] Lu H, Liu Y, Gou J, et al. Synergistic effect of carbon nanofiber and carbon nanopaper on shape memory polymer composite[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(8): 084102.
- [9] Liu Y, Du H, Liu L, et al. Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(2): 023001.
- [10] Vyvyan W W. Self-locking hinge: U. S. Patent 3,386,128 [P]. 1968-6-4.
- [11] Chiappetta F R, Frame C L, Johnson K L. Hinge element and deployable structures including hinge element: U. S. Patent 5,239,793 [P]. 1993-8-31.
- [12] Seffen K A, Pellegrino S. Deployment dynamics of tape springs[C]//*Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society, 1999, 455(1983): 1003-1048.
- [13] Francis W, Lake M S, Mallick K, et al. Development and testing of a hinge/actuator using elastic memory composites [C]//44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 2003.
- [14] 兰鑫. 形状记忆聚合物复合材料及其力学基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
Lan X. Shape Memory Polymer Composite and Its Study of Mechanical Foundations[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [15] Lan X, Liu Y, Lv H, et al. Fiber reinforced shape-memory polymer composite and its application in a deployable hinge[J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(2): 024002.
- [16] Lan X, Wang X, Lu H, et al. Shape recovery performances of a deployable hinge fabricated by fiber-reinforced shape-memory polymer[C]//*SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. International Society for Optics and Photonics, 2009: 728910-728910-8.
- [17] Lake M, Munshi N, Meink T, et al. Application of elastic memory composite materials to deployable space structures [C]//AIAA Space 2001 Conference and Exposition. 2001: 4602.
- [18] Arzberger S C, Tupper M L, Lake M S, et al. Elastic memory composites (EMC) for deployable industrial and commercial applications[C]//*Smart Structures and Materials*. International Society for Optics and Photonics, 2005: 35-47.
- [19] 王通. 形状记忆复合材料桁架结构的动力学行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Wang T. The Dynamic Behavior Research of Truss Structures Based on Shape Memory Polymer Composite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [20] Fang H, Shook L S, Lin J K H, et al. A Large and High Radio Frequency Deployable Reflector [C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012: 1838.
- [21] Luo Y, Duan B Y. The study of structure of space deployed antenna[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2005, 21(5): 30-34.
- [22] Love A W. Some highlights in reflector antenna development[J]. *Radio Science*, 1976, 11(8/9): 671-684.
- [23] Keller P N, Lake M S, Codell D, et al. Development of elastic memory composite stiffeners for a flexible precision reflector [C]//*Proceedings of the 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*. 2006: 2006-2179.
- [24] 阳鹏. 形状记忆聚合物复合材料空间可展开天线结构的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Yang P. Research on the Structure of Space Deployable Antenna based on Shape Memory Polymer Composite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)

- [25] 彭宁. 基于形状记忆复合材料的可展开天线设计及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Peng N. Design and Experimental Study of Deployable Antenna based on Shape Memory Polymer Composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [26] Cadogan D, Scheir C, Dixit A, et al. Intelligent flexible materials for deployable space structures (InFlex) [C]//SAE International Conference on Environmental Systems, 06ICES-91, Virginia, Beach, VA. 2006.
- [27] Hinkle A D, Lin J K, Whitley K, et al. Design Development and Testing for an Expandable Lunar Habitat [C]//AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition. 9-11 September 2008, San Diego, California.
- [28] Hinkle J, Lin J K H, Watson J. Deployment Testing of an Expandable Lunar Habitat [C]//AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition, 14-17 September 2009, Pasadena, California.
- [29] 刘立武, 赵伟, 兰鑫, 等. 智能软聚合物及其航空航天领域应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(5): 1-17.
Liu Liwu, Zhao Wei, Lan Xin, et al. Preliminary design and analysis of a cubic deployable support structure based on shape memory polymer composites [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(5): 1-17. (in Chinese)
- [30] 杨建中, 祁玉峰, 娄汉文. 航天器上使用的可解锁连接与分离装置[J]. 航天器工程, 2003, 12(1): 47-52.
YANG J Z, QI Y F, LOU H W. The connection and separation device on spacecraft [J]. Spacecraft Engineering, 2003, 12(1): 47-52. (in Chinese)
- [31] Wei H, Liu L, Zhang Z, et al. Design and analysis of smart release devices based on shape memory polymer composites [J]. Composite Structures, 2015, 133: 642-651.



(上接第 586 页)

- [6] Lunde P, Kester F. Carbon dioxide methanation on a ruthenium catalyst [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1974, 13: 27-33.
- [7] Li D, Ichikuni N, Shimazu S, et al. Catalytic properties of sprayed Ru/Al₂O₃ and promoter effects of alkali metals in CO₂ hydrogenation [J]. Applied Catalysis A: General, 1998, 172(2): 351-358.
- [8] Wang W, Wang S P, Ma X B, et al. Recent advances in catalytic hydrogenation of carbon dioxide [J]. Chemical Society Reviews, 2011, 40(7): 3703-3727.
- [9] Schlereth D, Hinrichsen O. A fixed-bed reactor modeling study on the methanation of CO₂ [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92(4): 702-712.
- [10] Kiewidt L, Thöming J. Predicting optimal temperature profiles in single-stage fixed-bed reactors for CO₂-methanation [J]. Chemical Engineering Science, 2015, 132: 59-71.
- [11] Alptekin G, Hitch B, Dubovik M et al. Prototype demonstration of the advanced CO₂ removal and reduction system [R]. SAE Technical Paper 2005-01-2862, 2005.
- [12] Pfefferle W C. Microlith Catalytic Reaction System: U. S., No. 5,051,241 [S]. 1991.
- [13] Brooks K P, Hu J L, Zhu H Y, et al. Methanation of carbon dioxide by hydrogen reduction using the Sabatier process in microchannel reactors [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(4): 1161-1170.
- [14] 周抗寒, 吴宝治, 任春波. 空间站 Sabatier CO₂ 还原系统的比较分析[J]. 航天医学与医学工程, 2011, 24(5): 384-390.
Zhou K H, Wu B Z, Ren C B. Comparative analysis of Sabatier CO₂ reduction system for space station [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2011, 24(5): 384-390. (in Chinese)
- [15] 李军, 艾尚坤, 周抗寒. 空间站 Sabatier CO₂ 还原装置实验研究[J]. 航天医学与医学工程, 1999, 12(2): 121-124.
Li J, Ai S K, Zhou K H. An experimental study of the Sabatier CO₂ reduction subsystem for space station [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 1999, 12(2): 121-124. (in Chinese)
- [16] 陈光文, 赵玉潮, 乐军, 等. 微化工过程中的传递现象[J]. 化工学报, 2013, 64(1): 63-75.
Chen G W, Zhao Y C, Yue J, et al. Transport phenomena in micro-chemical engineering [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2013, 64(1): 63-75. (in Chinese)