

卫星结构技术发展对新型复合材料的需求分析

陶炯鸣, 苏若斌, 孔祥森, 赵川, 周静

上海卫星工程研究所, 上海 200240

摘要 新材料、新工艺的不断进步和变革是卫星结构技术发展的基础和保障, 结构技术的发展方向与需求又是新材料、新工艺发展的源动力。本文从设计角度出发, 根据后续卫星型号发展趋势, 梳理了结构专业技术的重点发展方向, 提出了后续新型复合材料的应用需求。

关键词 卫星结构技术; 新材料; 复合材料

随着航天产业的快速发展, 各种新理念、新技术、新产品不断涌现, 这些都需要有较强的材料研发能力和工艺制造水平为基础。复合材料凭借其高比强度、比模量及优异的功能特性逐渐成为航空航天领域的主导材料, 特别是在卫星结构领域的应用日益广泛, 甚至出现了全复合材料制造的卫星结构。伴随着卫星型号发展的多元化趋势, 对各种新型复合材料应用的需求变得日益迫切。本文从设计角度出发, 以卫星型号总体发展要求和技术指标为牵引, 结合后续卫星型号发展趋势, 梳理了结构专业技术的重点发展方向, 并以此为基础提出了对新型复合材料的发展需求。

1 后续卫星型号发展趋势

当今世界, 外层空间成为国际军事、民用领域竞争新的战略制高点^[1]。卫星以轻量化、低成本、高可靠的优势, 实现以较大的频度进行航天发射, 从而提高效率比, 获取高的经济效益是卫星技术发展的重要目标。基于上述目标后续卫星型号的发展主要呈现以下3种趋势:

1) 高精度、高分辨率对地观测。0.1 m甚至更高分辨率的对地观测卫星需携带体积、重量更大的有效载荷, 因此平台结构和有效载荷结构的融合将是后续卫星发展的大趋势之一。此外, 高分辨率对地观测对平台结构的尺寸稳定性提出了角秒级的高精度要求。要综合考虑热变形、吸湿变形和残余应力变形的影响并具备高精度的在轨实时测量和调节能力。

2) 天基攻防与对抗。天基攻防与对抗卫星是控制空间重要组成部分, 是维护空间安全的重要航天装备之一, 是夺取未来制天权的重要武器。空间攻防与对抗的发展以空间

打击平台和卫星的防护为主。为应对基于天基平台的打击, 卫星必须开展健康监测和打击定位研究, 准确识别打击损伤和部位。同时开展防护结构和隐身技术的研究, 提升卫星的抗打击能力。远期的研究目标是应开展自修复技术的研究。

3) 面向突发事态的快速响应。发展快速响应卫星技术, 可以弥补现有卫星体系对重点区域、重点目标重访周期长、存在覆盖盲区等方面的不足, 同时用于应对战时、自然灾害的应急发射, 满足对特定区域特定频段目标的探测需求。为提高卫星的快速响应能力对轻型、多功能结构技术, 通用化平台技术, 快速制造与检测技术提出了更高的要求。

2 结构技术重点发展方向

为了满足未来卫星型号的需求, 结构专业技术的发展主要集中在高稳定、轻量化、高承载、低响应、多功能等方面, 主要研究方向为:

1) 高稳定轻量化结构技术。影响卫星对地观测分辨率、定位精度的因素很多, 其中由于卫星在轨运行时的温度、真空度及微重力环境导致的平台结构在轨变形对分辨率、定位精度的影响最大。目前国内卫星平台结构在轨变形抑制手段仍较为单一, 在轨变形控制精度相较于国外先进水平仍具有一定差距, 平台结构在材料性能优化、结构构型优化及变形隔离技术等多方面仍存在一定的差距。为满足遥感卫星对于成像质量、分辨率、卫星指向精度、承载能力等越来越严苛的发展趋势, 需要开展高稳定轻量化结构技术的研究。通过进一步开发轻量化、高尺寸稳定性的结构材料, 使已有的轻质材料在现有比刚度、比强度好的情况下, 兼具良好的尺寸稳定性, 以达到减轻平台结构重量、提高平台精度稳定性

收稿日期: 2015-11-30; 修回日期: 2015-12-20

作者简介: 陶炯鸣, 高级工程师, 研究方向为卫星结构设计, 电子信箱: 19808313@qq.com

引用格式: 陶炯鸣, 苏若斌, 孔祥森, 等. 卫星结构技术发展对新型复合材料的需求分析[J]. 科技导报, 2016, 34(8): 18-20; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.08.002

的目标。

2) 大变形弹性材料可展结构技术。由于运载火箭整流罩包络限制,卫星用太阳能电池阵、大型天线,可展开桁架、可展开梁等大型空间可展开结构,在发射前必须折叠或卷曲收拢,到达空间预定轨道后,再驱动展开。使用能发生大变形的弹性材料制备卫星可展结构,可解决传统机械式展开机构铰接头组件多、操作复杂、展开可靠性低的缺点,提高结构展开的可靠性与稳定性。在航天领域,能通过自身物理属性实现柔性收拢和展开恢复刚度的薄壁支撑结构技术是建立在成熟的材料技术基础之上的^[2]。其中 Ω 形杆是一种典型的可收拢和展开结构,在发射前可将其折叠,当在轨工作时展开,其支撑结构的刚度介于刚性结构与柔性结构间,贮存容积很小,是空间可展结构的重要发展方向。

3) 结构健康监测与修复技术。各类卫星完成地面装配以后需要经历地面存放、力学环境试验、运输、发射主动段振动和长期的空间冷热交变温度载荷环境,振动和温度变化会导致卫星平台产生严重的内应力,引起卫星结构的变形甚至破坏。另外随着人类空间活动的日益频繁,空间碎片环境日益恶化,各类空间武器的出现已经对卫星的安全运行构成现实威胁。如果不能及时发现损伤并采取措施,就可能引发灾难性后果。基于上述原因有必要对卫星平台的健康状态进行监测,在损伤发生时及时对损伤位置和程度进行评估,并启动自修复功能,提高卫星的在轨服役寿命。目前采用的结构健康监测技术包括基于结构振动分析的监测方法和基于结构应力应变的监测方法;在修复技术方面,利用埋植技术制备自修复高分子复合材料是迄今比较成功的方法。

4) 高功能密度结构技术。当前,国际上小卫星的发展趋势是“更快、更好、更省和更小”,实现这样一个动态目标不仅需要继承大卫星发展过程中积累的成功经验,还需要移植其他领域的新技术、新工艺,尤其需要观念的更新。由此高功能密度结构技术的发展成为一大关键。在传统的航天器中,结构功能、热控功能和电子功能是各自独立的设计单元。结构的承载板、框架以及外壳,热控制的散热器和冷却板及电子设备的黑盒子,这些单一功能单元在航天器最后装配时用螺钉装配到一起^[3]。单元之间的功率分配和信号传输通过连接器和成捆电缆实现。多功能结构的概念就是将电子线路的外壳、电连接器、数据传输、封装、支架、热控等辅助部件加以集成,与无源电子线路一起敷设在结构的复合材料中,采用新方法将有源电子线路与机械表面直接接触。把数据传输、配电网、测控、数据管理和热控等分系统都集成在结构上,使结构分系统兼有数据传输、配电、热控等多种功能。

同时高功能密度的结构技术可以更好地适应以有效载荷为中心进行一体化构型设计与布局,以此提高卫星的功能密度。我国在近些年提出平台和载荷结构一体化的设计概念,旨在通过高功能密度的结构技术实现一体化的构型设计、热控设计,并对由此带来的光、机、热多种学科之间的耦

合影响等问题进行研究。

3 新型复合材料应用需求

卫星结构专业技术的发展与新材料的研发、制备工艺的不断创新息息相关,随着复合材料的大量应用,结构与材料的关系变得愈发紧密,并呈现出一体化的发展趋势。卫星结构技术的发展方向对新型复合材料应用的需求主要集中在以下几个方面:

1) 高导热微变形复合材料。由于碳纤维增强复合材料密度小,弹性模量高,热膨胀系数较小,并且可以实现“零膨胀”设计,在卫星结构如桁架结构、蜂窝夹层结构中有大量的应用,但现有常用的树脂基碳纤维增强复合材料由于树脂的导热性能较差,导致复合后的复合材料导热性能较差。高导热微变形复合材料通过对树脂基体的改性,在保持原有低热膨胀系数的基础上,提高了材料的导热率,满足在轨热变形控制以及热控要求^[4]。

目前国外已制造出采用沥青基的碳纤维增强复合材料,并利用激光照射法进行材料测评,得到弹性模量最大可达到560 GPa,热导率达480 W/m·K。国内已实现短纤维制造,但尚无法进行连续长沥青基纤维制造,而且制得的纤维虽然热导率提高,但是强度较低,不能完全作为结构材料使用。

2) 高阻尼复合材料。阻尼减振不仅是结构设计的要求,同时也是对材料性能的要求,在满足力学性能的前提下,高阻尼复合材料通过改性树脂,提高阻尼特性,实现结构-阻尼功能一体化,满足卫星结构对于阻尼减振材料的需求。高阻尼复合材料主要应用于板式蜂窝夹层结构、桁架结构、支架结构等。

目前,纳米改性大阻尼碳纤维研究较为引人注目。纳米材料通过优化内部的空间结构,可以显著增加材料内部的摩擦。理论分析和试验研究表明,乳胶型互穿网络结构纳米粒子具有强迫互容、界面互穿、双向连续、协同作用等独特结构和性能,可以使复合材料铺层结构通过互穿网络结构方式结合起来,形成物理互锁,从而增大分子内部的摩擦^[5]。表现在宏观结构上,就是整体阻尼特性的增强。但是通过纳米改性之后,铺层复合材料在明显提升阻尼特性的同时,层间剪切强度下降较为明显,这导致了在卫星支撑结构特别是主承力结构上的应用受到限制。

3) 形状记忆复合材料。形状记忆复合材料是通过将形状记忆材料置于复合材料中,利用形状记忆材料的形状记忆效应、伪弹性和高阻尼能力等实现复合材料功能的一种智能复合材料。主要应用于卫星可展开桁架、可展开天线、可展开铰链机构,太阳能电池阵平板结构等。这种复合材料是国际智能材料与结构领域的最新研究成果,通过该材料的应用可有效解决卫星本体尺寸受限于运载火箭整流罩空间的问题,研发出尺寸大、重量轻、刚度好、收拢体积小、展开可靠性高的空间可展结构。

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,美国智能微型可操控卫星(DiNO Sat)太阳能电池板应用形状记忆聚合物复合材料铰链进行驱动。在超大型展开机构的研制和应用方面,美国已成功进行了形状记忆伸展臂式天线在轨飞行验证。国内相关研究及应用尚不系统和完善。

4) 自修复复合材料。自修复复合材料是一种新颖的仿生结构功能材料,它能够通过对外界造成的不可见裂纹自动(或在施以外界刺激的情况下)进行修复,使裂纹基本愈合从而达到性能可以基本维持的目的,为预防潜在的危害提供了一种新方法。通过自修复复合材料的应用可以有效提高复合材料的整体性能和安全性可靠性,是近年来世界各国特别是发达国家研究的热点。未来采用自修复材料制造的航天器将具有更可靠的性能,更长的工作寿命,更重要的是在军用卫星领域面对日趋激烈的空间攻防与对抗要求将具有更强的生存能力。

近年来自修复复合材料已成为各国特别是发达国家的研究热点,并从基于“单点埋植技术”的第一代自修复材料向基于“人体血管仿生”的第二代自修复材料推进^[6]。国内目前的研究工作大多集中在微胶囊改性热塑性聚合物上,属于第一代自修复高分子复合材料。

4 结论

新材料、新工艺的不断进步和变革是卫星结构技术发展的基础和保障,另一方面结构技术的发展方向与需求又是新材料、新工艺发展的源动力,两者密不可分,互相依靠又互相推动。在卫星结构技术的发展过程中需要时刻关注新型复

合材料的研发动向,同时用新的设计理念与思想牵引材料与工艺技术的发展,为卫星型号的成功研制奠定坚实的基础。

参考文献(References)

- [1] 马亚红, 任登高. 国外军事通信卫星发展现状及趋势[J]. 国防科技, 2011(2): 75-79.
Ma Yahong, Ren Denggao. Development and trends of foreign military communications satellites[J]. National Defense Science & Technology, 2011(2): 75-79.
- [2] 杜善义, 张博明. 先进复合材料智能化研究概述[J]. 航空制造技术, 2002(9): 17-20.
Du Shanyi, Zhang Boming. The overview of investigation of smart advanced composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002(9): 17-20.
- [3] 张博明, 刘双. 航天器多功能结构的研究现状及其应用前景[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 493-497.
Zhang Boming, Liu Shuang. Investigation on status and prospective application of composite multifunctional structures technology[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(2): 493-497.
- [4] 陈烈民, 沃西源. 航天器结构材料的应用和发展[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(1): 58-61.
Chen Liemin, Wo Xiuyan. The application and development of astronautic structural material[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, 28(1): 58-61.
- [5] 张鉴伟, 江大志. 碳纳米管及连续碳纤维增强复合材料研究进展[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(3): 63-68.
Zhang Jianwei, Jiang Dazhi. Research progress of carbon nanotube and continuous carbon fiber reinforced composites[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009, 30(3): 63-68.
- [6] 王明存, 朱海荣. 高分子材料自修复机理的研究进展[J]. 材料导报, 2012(11): 89-94.
Wang Mingcun, Zhu Hairong. Progress in the self-healing mechanisms of polymeric materials[J]. Materials Review, 2012(11): 89-94.

Requirement analysis of new composite materials on the development of satellite structure technology

TAO Jiongming, SU Ruobin, KONG Xiangsen, ZHAO Chuan, ZHOU Jing

Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China

Abstract The continuous progress and innovation of new materials and new techniques have provided a solid basis for the development of satellite structure technology. On the other hand, the developing trend and requirements of structure technology are the source power of new materials and new techniques. The development of new techniques and new materials will promote the development of satellite structure technology, and vice versa. From the view of designing, this paper summarizes the key development orientation of specific structure technology according to the subsequent development trend of satellites. Meanwhile, the application requirements of new composite materials are proposed.

Keywords satellite structure technology; new materials; composite materials

(编辑 傅雪)