

航空航天智能材料与智能结构 研究进展*

杨正岩¹,张佳奇¹,高东岳^{1,2},刘科海¹,武湛君¹

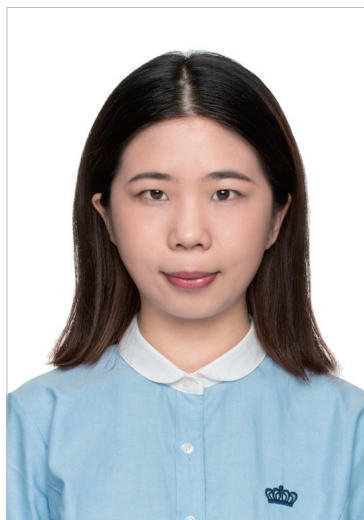
(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室,大连 116024;

2. 斯坦福大学航空航天学院,斯坦福 94305)

[摘要] 智能材料作为新兴多功能材料,能够实现结构功能化、功能多样化。智能结构是在结构中集成智能材料作为传感器和驱动器,使结构除了具有承载、传力、连接等功能外,还具有自感知、自诊断、自驱动、自修复等能力,以更好地适应外界环境的变化,可显著提升航空航天架构的性能。目前智能材料与智能结构已成为航空航天架构减重增效研究的重点。根据国内外智能材料和结构的研究进展,综述了压电材料、铁磁材料、形状记忆材料、智能复合材料等智能材料的发展;讨论了智能结构的研究及应用前景,包括自诊断智能结构、自修复智能结构和减振降噪智能结构;最后,指出了智能材料与结构当前面临的一些挑战性问题,展望了其在航空航天领域的应用前景。

关键词: 智能材料;智能结构;自诊断;压电材料;形状记忆材料

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.17.036



杨正岩

博士研究生,研究方向为线性/非线性超声导波、结构健康监测、半解析有限元超声导波理论、传感器设计与优化,发表 SCI 1 篇。

*基金项目:国家自然科学基金项目(91016024);国家自然科学基金项目(51475067)。

传统结构制造完成,不能做到实时感知环境以及自身状态的变化,更不能做到自适应和自修复。智能化与智能材料和结构技术存在着内在关系^[1]。20世纪70年代末“结构智能化”的概念首次被美国军方提出,目的是为了提高飞行器的使用性能和安全性^[2]。结构智能化概念包括智能材料和智能结构两部分。智能材料是指自身一种或多种性质(如阻尼、刚度、形状、电阻等)会在激励(如力、热、光、电、磁等)作用下,发生显著变化的材料^[3]。智能结构的特点是将结构和传感器、驱动器、控制元件的复合与组装,构成智能结构体系^[4],使结构本身具有自感知、自诊断、自驱动、自修复等能力。这个特点使智能结构区别于传统的主动控制结构,使之具备多种智能性能。相比之下,智能结构由于利用了智能材料的固有驱动、传感特性,直

接将智能材料集成到结构之中,使得其智能和自适应特点更明显,能够更好地实现结构的功能。国内外对飞行器结构智能化开展许多研究,如针对飞行器变形的研究的“智能翼”计划^[5-7]、SAMPSON计划^[8]、NASA Aircraft Morphing计划^[9]等以及相应学者对结构和材料方面的研究和总结^[10-11];针对飞行器减振降噪技术的研究^[12-13];针对自诊断智能结构的研究^[14];针对飞行器加工和装配过程的智能化研究^[15-17]等各种领域的研究。

本文基于上述背景,从智能材料、基本性质、使用实例和应用价值等方面对智能材料目前的研究和应用现状进行综述性介绍,并总结了现今航空航天智能材料、结构研究及应用中出现的 key 问题,展望了航空航天智能材料和结构未来发展的趋势。下面分别对这几种主要的智能材料

和结构进行介绍。

智能材料及研究进展概述

20世纪80年代中期,人们提出了智能材料的概念^[18]。智能材料根据其在工作时发挥作用的不同,可以分为两大类:一类是可以感知外界刺激的智能材料,统称为感知材料,可以用来制成传感器以感知外界环境以及自身工作状态的变化。例如压电材料、形状记忆材料、铁磁材料、光导纤维、光/湿/热/气敏材料等。另一类则是能够在外界环境或内部状态发生变化后做出恰当响应的材料,该类材料常用来做执行器。例如形状记忆材料、压电材料、铁磁材料既可以做感知材料,也可以做执行材料,而某些高分子复合材料,例如自愈合材料是很好地执行材料。

1 压电材料

1.1 基本性质

压电材料是实现机械能-电能转换的一类智能材料。在众多智能材料中,压电材料由于具有大带宽信号,高能量转换率,快机电响应等特点,广泛应用于传感、驱动、换能以及振动控制等领域。另外,压电材料还可承受一定程度的高温环境^[19]。如图1所示,正/逆压电效应反应的是一种机电耦合效应,即基于这两种效应机械能和电能可以相互转换。利用压电材料的正压电效应,即外力作用下产生电荷的效应,是常用来作传感器的智能材料。利用压电材料的逆压电效应,即在外电场作用下,材料产生变形的一种效应,可以用作驱动器的材料。由于其具有大带宽信号、高能量转换率、快机电响应等优点,广泛应用于传感、驱动、换能以及振动控制等领域。

1.2 分类

压电材料可分为压电晶体、压电聚合物和压电陶瓷3种。其优缺点和具体应用如表1所示^[20-26]。

常用的压电陶瓷如,锆钛酸铅、

钛酸钡、偏铌酸铅、铌酸铅钡锂等,具有优越的压电性能和温度稳定性以及居里温度。航空航天领域急需在极端环境,如高温环境下(500℃及以上)正常工作的电子设备^[27],高居里温度是研究热点。

钛酸铅基压电陶瓷压电性能与锆钛酸铅基压电陶瓷相当,居里温度却比其高近100℃,在高温压电的应用研究领域最有潜力。2001年,Eitel等^[28]提出铋系高温压电陶瓷体系,压电性能与传统PZT相当,具有450℃的居里温度。2005年Zhang等^[29]对BSPT进行Mn掺杂,提高了其温度稳定性。2008年Yao等^[30]向BSPT体系引入 $Pb(Sc_{1/2}Nb_{1/2})O_3$,居里温度保持在405℃,且具有较高的压电常数。Jiang等^[31]在2011年

提出 $(1-x)(BiScO_3-0.64PbTiO_3)-xLiNbO_3$ 体系,压电常数达505pC/N,相转变温度在380℃附近。

常用压电陶瓷材料性能对比如表2所示^[32],更多压电陶瓷材料性能见文献^[33],LiNbO₃的居里温度达1150℃,适应高温要求,适合耐高温环境传感器的应用。

2002年,德国空间中心(EADS)将压电陶瓷片粘贴在飞机变速箱杆上组成智能变速箱杆,通过压电驱动器激励各方向的振动来控制从变速杆传递到机身处的结构噪声,智能变速箱杆如图2所示^[34]。

EADS用智能变速箱杆代替原有的变速箱杆在BK117直升机上做了飞行测试,测试结果表明这种基于压电陶瓷的主动减振系统在任何环

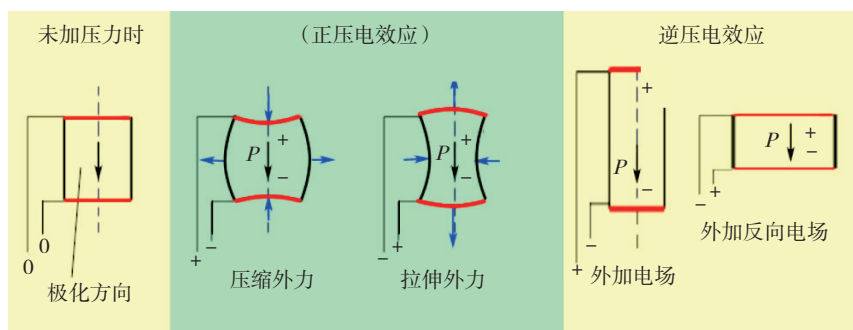


图1 压电效应
Fig.1 Piezoelectric effect

表1 压电材料比较

压电材料类型	优点	缺点	应用	常见材料
压电晶体	稳定性好,机械强度高	低压电常数、低介电常数	压电振荡器、压电滤波器	石英
压电聚合物	柔性,轻质,高韧性,温度稳定性、低声阻抗和机械阻抗	低压电常数,工作温度低,制备成本相对较高	超声换能器、微重力驱动器、柔性传感器、超声传感器等	PVDF
压电陶瓷	高压电常数、高耦合系数、高介电常数、耐高温、制备技术相对成熟	脆性、密度大,部分含有毒性	耐极端环境传感器、振动控制、降低噪声、大位移驱动器等	PZT、BaTiO ₃ 、LiNbO ₃

表2 常用压电陶瓷材料性能比较

压电材料	结构	居里温度/℃	介电常数 / (pF·m ⁻¹)	压电常数 d ₃₃ / (pC·N ⁻¹)	机电耦合系数 k ₃₃
PZT-4	钙钛矿	328	1300	289	0.713
LiNbO ₃	刚玉	1150	30	6	0.16



图2 智能变速箱杆
Fig.2 Smart gearbox strut

境下工作都很稳定,并且在试验频率下变速箱支撑杆的振动得到了良好的控制。智能变速箱杆在BK117上的实际安装如图3所示^[34]。

压电陶瓷是一种应用广泛的智能材料,但也有自身的不足之处,如材料机械强度低,传统含铅压电陶瓷的环境污染性以及使用过程中仅利用其单一性能等。未来压电陶瓷将朝纳米尺度、无铅、多功能新型铁电性等方向发展。

对于压电材料的研究还存在很多的问题,传统压电陶瓷材料机械强度低,含铅压电陶瓷的环境污染性以及使用过程中仅利用其单一性能,压电聚合物压电性能较差等。未来压电材料将朝耐极端环境、纳米尺度、无铅、多功能新型压电性等方向发展。

2 铁磁材料

2.1 基本性质

铁磁材料是实现机械能-磁能转换的一类智能材料。铁磁材料在磁场作用下发生变形,这种现象称为磁致伸缩效应。利用磁致伸缩正效应,即磁场作用下材料发生变形,可用作驱动器;利用磁致伸缩逆效

应,即材料发生变形后产生磁场,可用作传感器。利用磁致伸缩正逆耦合效应,可以开发集驱动、力测量、输出力感知和输出力可控等功能于一体的精密驱动器^[35-36]。

2.2 分类

铁磁材料根据功能分为软磁材料、硬磁材料、矩磁材料、旋磁材料、压磁材料5大类,其具体特性和应用见表3^[37-38]。

目前铁磁材料研究热点集中在超磁致伸缩材料。超磁致伸缩材料为基础的传感器,具有分辨率高、体积小、伸缩系数大、机电耦合系数大、承受压力大等优点。超磁致伸缩材料因为其优越的性能在航空航天领域有着广泛的应用,采用超磁致伸缩材料实时感知外界环境的变化自适应机翼,利用磁致伸缩效应通过机翼变形来改变翼型和攻角,获得飞行器最佳的气动特性^[39];超磁致伸缩材料在飞机和空间站振动主动控制中起着重要作用^[40];超磁致伸缩材

料还可用于飞行器的减振降噪, Lord公司研发的基于超磁致伸缩材料的智能降噪系统,减小机舱内的噪声达20dB,起到很好的降噪效果^[41]。

3 形状记忆材料

3.1 基本性质

形状记忆效应是指具有一定初始形状的材料经形变并固定成另一种形状后,通过热、光、电等物理刺激或化学刺激的处理又可恢复成初始形状的一种特性,具有这种特性的材料称为形状记忆材料(Shape Memory Materials, SMM)。形状记忆材料可集传感、驱动及执行机构为一体,成为“智能”材料系统中重要材料。

20世纪80年代以来,形状记忆材料在航空航天领域的应用已得到广泛的研究^[42]。其中依赖形状记忆材料的新型智能变形飞行器的发展将是飞行器智能化的一大重要突破^[43]。

3.2 分类

(1)形状记忆合金。

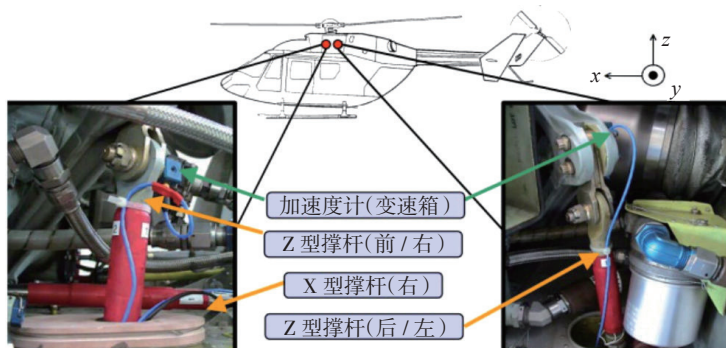


图3 智能变速箱杆在BK117上的实际安装
Fig.3 Smart gearbox struts installed in BK117 test helicopter

表3 铁磁材料分类比较

铁磁材料	特性	应用	常见材料
软磁材料	磁导率高、矫顽力小、易于退磁	航空高频点火系统等能量转换装置	FeCo 基软磁材料
硬磁材料	矫顽力大,不易退磁	航空航天用高速永磁发电机等能量转换装置	稀土永磁、SmCo 永磁材料、AlNiCo 永磁合金
矩磁材料	磁滞回线接近矩形,矫顽力低	记忆元件	锰镁铁氧体、锰镁铁锌铁氧体、含镍 50% 合金
旋磁材料	微波下,产生铁磁共振、法拉第旋转效用	微波器件	石榴石铁氧体、镁锰铁氧体
压磁材料	磁致伸缩效应	测量力、速度等传感器,振动控制	纯镍、钴铁氧体

形状记忆合金具有抗疲劳性能和延展性能优异,并且在高温环境下,形状记忆合金相对普通合金性能更加优异^[44]。这些优于普通材料的特殊性能使得形状记忆合金在航空航天领域具有广阔的发展前景,如图4所示波音777-300ER飞机发动机利用形状记忆合金降低噪声影响^[45]。

形状记忆合金在国内外已经开展了很多研究。AdaptaMat公司利用形状记忆合金制备驱动器^[46],实现了较好的驱动性能。国内沈阳工业大学团队利用形状记忆合金利用仿生学原理成功制备了蠕虫型直线电机样机^[47],可以利用磁场控制微位移。

(2) 形状记忆高分子。

形状记忆高分子有可恢复率高、质轻、加工成本低、耐腐蚀等优于形状记忆合金的特点,受到了广泛关注^[48]。由于形状记忆聚合物变形能力强、恢复率高等特点,常用于变型机翼蒙皮材料^[49]。形状记忆材料是当今智能材料领域的研究热点之一,但是仍存在一些不足之处。对于形状记忆合金抗疲劳性能研究较少,应建立可靠的评价体系;形状记忆高分子虽然有很多优点,但在应用上还有一定的局限性,主要表现在驱动方式和刚度性能差两个方面,寻找更有效、更易实现、更具普遍性和适用性的驱动方式成为最近几年的研究重

点方向和热点。

4 智能复合材料

每种智能材料都有其自身的局限性,智能复合材料可以克服智能材料自身局限性,使得智能材料性能更加优良,具有很大的发展和使用前景,是未来智能材料的发展趋势。

4.1 压电复合材料

压电复合材料是21世纪70年代发展起来的一种多用途功能复合材料。压电复合材料相较于传统压电陶瓷,虽然其声阻抗、密度、压电常数降低,但是其机电耦合系数却大幅度提高,且极大改善压电陶瓷易脆的缺点。压电纤维复合材料是目前压电复合材料的研究重点,主要有3种,1-3型压电纤维复合材料、AFC(Active Fiber Composite)和MFC(Macro Fiber Composite)。

如图5所示^[50],AFC由Bent提出^[51],由挤压工艺单独加工,易导致压电纤维损坏和排列不整齐等问题。为此美国国家航空航天局的Langley研究中心研究了一种宏纤维复合材料(MFC),是片状层合结构,其性能比传统压电陶瓷提高两倍^[52]。F/A-18是双垂翼飞机,结构容易因为振动产生疲劳现象,采用多层MFC驱动器应用于垂尾的两个表面上来抵消载荷产生的振动,可以有效抑制结构动态响应和动态力学应变,取得较好减

振效果,如图6所示^[53]。

常用的压电材料自身常存在一些缺点,如压电陶瓷脆性大、密度高,压电薄膜使用温度低、压电性能不佳等。所以在以后的研究中,压电复合材料是压电领域的研究重点,可以克服单体材料自身的一些缺点,今后对压电复合材料的加工性能改善、性能增强以及设计等问题还需要进一步研究。

4.2 铁电/铁磁复合材料

铁电/铁磁复合材料是一种集合了铁电相和铁磁相的特点,还具有磁电转换功能的新材料,具有特殊的磁电效应。常见的铁电/铁磁复合材料有Terfenol-D/PZT、Terfenol-D/PVDF等。铁电/铁磁复合材料由于其独特性能,在微波领域、磁场感应器、磁电传感器、航空航天等领域有着广泛的用途^[54-56]。

4.3 形状记忆复合材料

近40年时间里,国内外学者和机构对形状记忆复合材料开展了大量深入研究^[57-59]。从20世纪90年代后期开始,国外研究学者开展了对形状记忆复合材料的大量应用研究,并取得了一些进展,如:柔性可展太阳翼、天线柔性反射面、可变形机翼等^[60-62]。国内哈尔滨工业大学团队以Veriflex为基体材料、T300碳纤维织物为增强基材料,成功研制出形



图4 波音777-300ER飞机发动机利用形状记忆合金降噪

Fig.4 Noise-control with shape memory materials at Boeing 777-300ER airplane engines

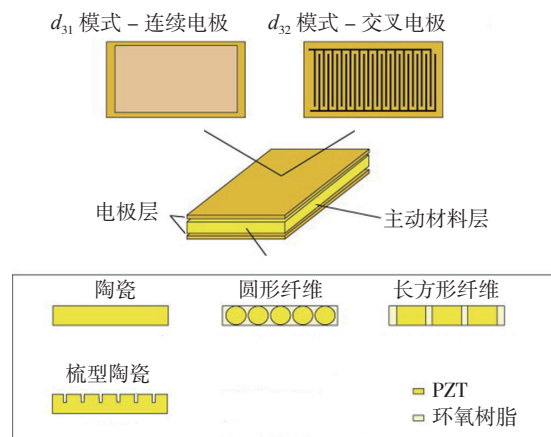


图5 常见的压电复合材料

Fig.5 Common piezoelectric materials

状记忆铰链(SMPC),克服了形状记忆聚合物低强度的缺点,材料能够实现高应变,避免纤维疲劳,试验证明SMPC 是很好的可展开结构,如图7、8所示^[63]。

4.4 自愈合复合材料

在航空航天领域中,材料的耐损伤性是一个十分重要的问题。运载智能结构本身具有自动缓解机制,缓解机制是指在循环载荷作用下结构恢复承载能力或者减少损伤累计比率的一种机制。具有对初期损伤的自愈能力的材料就能自行处理未检测到的微小损伤,而这些微小损伤可能对结构完整性发生很大破坏,这就是一种高效固有的缓解机制。自愈合复合材料主要有三维脉管网络、微胶囊、热可逆交联反应和碳基自愈合复合材料。

(1) 三维脉管网络自愈合复合材料。

三维脉管复合材料网络材料自愈原理是在受到挤压或损坏时释放修复剂,可有效修复受损处的微小裂

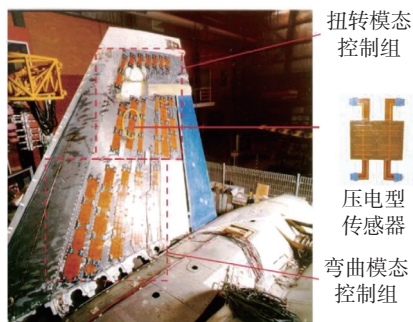


图6 F/A-18飞机垂尾抖振压电主动控制
Fig.6 Smart structure based buffet load alleviation system on a full-scale F/A-18 vertical tail

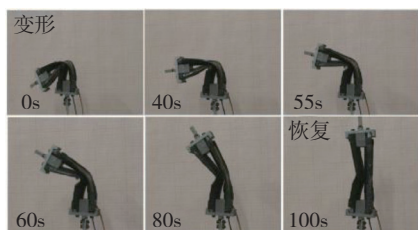


图7 SMPC铰链形状恢复过程
Fig.7 Shape recovery process of the SMPC hinge

缝。飞行器在飞行过程中遭受的轻微损伤的三维脉管网络复合材料将会在修复剂释放过程中得到修复,如同人体外源性凝血机制使小伤口停止流血一样。

美国伊利诺伊大学厄巴纳-尚佩恩分校的研究团队于2014年创造了一种纤维基增强复合材料的自愈材料,采用三维脉管网络,极大地解决了纤维基增强复合材料在使用过程中的分层问题,有望解决玻璃纤维复合材料出现细微裂纹构成安全隐患的问题,自愈系统如图9所示^[64]。

(2) 微胶囊自愈合复合材料。

微胶囊型自愈合复合材料于2001年首次发表在Nature杂志^[65](图10),微胶囊自愈合技术是将包覆有愈合剂的微胶囊与催化剂一起植入到基体材料中,微胶囊在基体材料产生微裂纹时破裂,胶囊内的愈合剂会通过毛细管虹吸作用到达裂纹面,与

分散在基体中的催化剂引发聚合达到修复裂纹的目的^[65]。由于航空航天等国防领域对所用材料的有较高的性能要求,用于此领域的自修复微胶囊应具备密封性能良好、包封率高及好的热稳定性等特点^[66]。

(3) 中空纤维自愈合复合材料。

中空纤维自修复方法是欧洲太空总署提出的概念,其修复机理是将中空纤维埋植在基体材料中,中空纤维内装有类似粘合剂的未固化树脂和固化剂流体,材料受到低冲击载荷发生破坏时,通过释放空心纤维内的修复剂流体粘接裂纹处实现损伤区域自修复^[67]。

中空纤维内装有双组分修复剂的修复机理如图11所示^[68],该组分可在固化剂作用下实现自修复。中空纤维法的优势在于修复剂含量足够修复损伤,可以填充不同固化机制的树脂,可以实现损伤可视化,中空

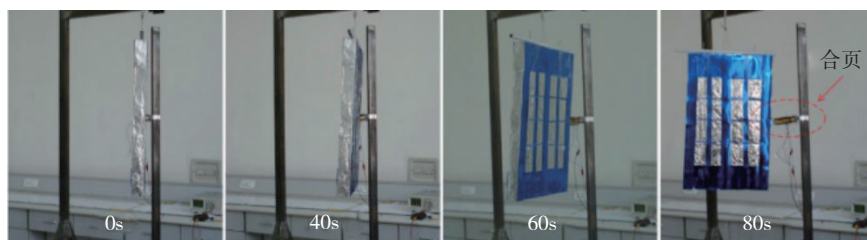


图8 SMPC铰链驱动太阳能电池阵展开过程
Fig.8 Shape recovery process of a prototype of a solar array actuated by an SMPC hinge

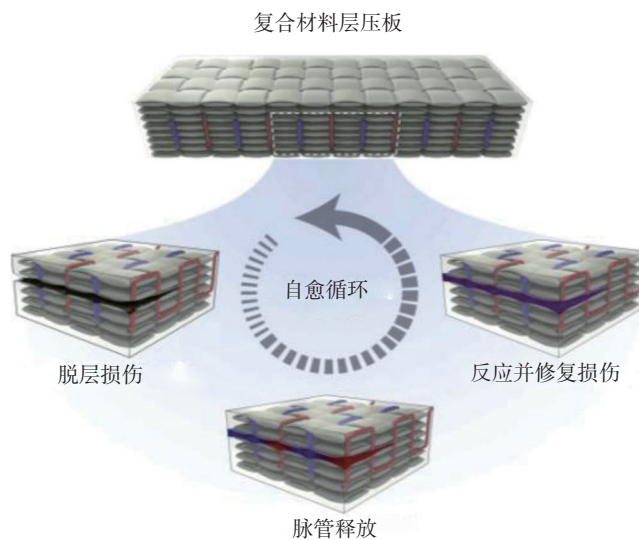


图9 纤维基增强复合材料的自愈过程
Fig.9 Life-cycle of a self-healing microvascular fiber-composite

纤维易于和传统增韧纤维混合和调整;存在的不足是纤维必须断裂释放修复液,必须采用低黏度树脂利于浸润,中空纤维引入碳纤维增强复合材料会造成热膨胀系数的不匹配,制造过程需要多级程序,较复杂。

利用自修复技术修复复合材料冲击损伤的方法有了一定应用。Dry^[67]在环氧树脂基复合材料中嵌入装满粘合剂的空心纤维,施加一定的外界载荷使复合材料纤维断裂,黏合剂流出阻止裂纹进一步扩展。Trask等^[69]分别将树脂和固化剂填充于复合材料中空纤维中,通过模拟冲击破坏试验,材料的破损区域可以进行

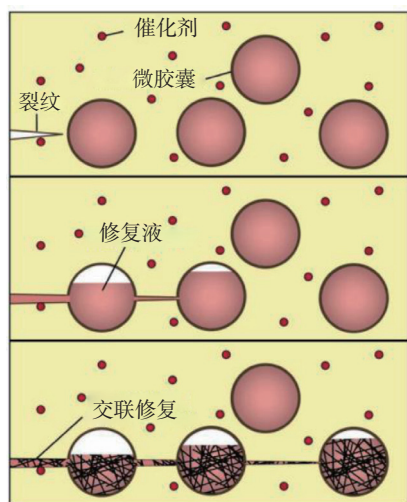


图10 微胶囊自愈合机理

Fig.10 Autonomic healing concept

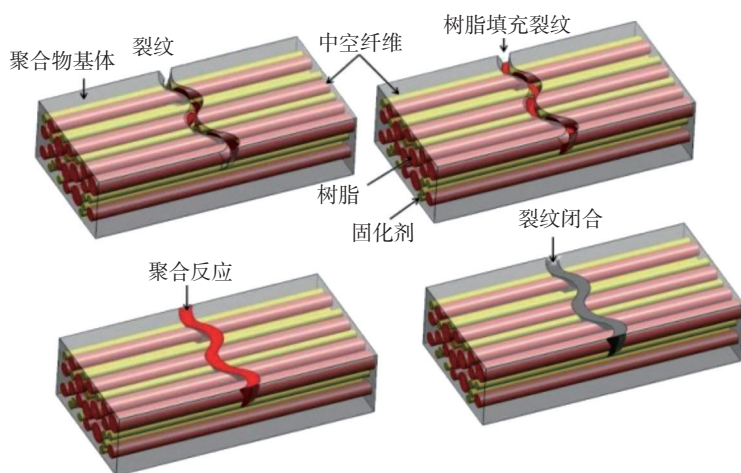


图11 中空纤维自修复的修复机理

Fig.11 Schematic representation of self-healing concept using hollow fibers

自愈合修复。

自愈合复合材料可以在对损伤做出感应后自行处理材料损伤,具有成本低廉、更安全可靠、减少维护费用等优点。虽然自愈合复合材料已经取得很大的进展,但是如何使自愈合复合材料更加可靠仍需要进一步研究与探索,对于自愈合复合材料的应用也有待于进一步开发。同时研发高温下使用的自修复材料也是研究的一大热点。

5 智能材料研究存在问题及展望

智能材料作为目前航空航天材料研究的一个热点分支,是一个集合物理、化学、材料、机械、力学等众多领域的研究,具有广阔的发展前景。但是对其研究还存在着诸多问题,例如材料复合化的相容性问题、小型化的制作加工问题、材料力学性能设计提高的问题以及如何在航空航天领域复杂环境下的应用问题都是亟待解决的,这些问题也制约了智能材料大规模应用。

智能材料纳米化、薄膜化、复合化,是其今后的发展方向,此外,压电材料和铁磁材料的耐极端环境的使用问题;发展形状记忆材料疲劳测试体系;自愈合材料的热稳定性、可靠性、自修复性能更是未来研究热点。

智能结构的研究及应用概述

智能结构将基体、传感器、驱动器和控制元件复合与组装,不仅使结构具有承力、传载,还具有自诊断、自适应、自修复等功能。目前智能结构的发展经历了以下阶段:(1)将传感器集成在材料中使结构带有自诊断功能,可以监测结构自身的完整性、损伤情况以及振动情况等;(2)在自诊断基础上可以修复自身状态,即具有了自修复功能。对于智能材料自修复功能研究难度较大,并且处在实验室阶段,实用报道较少^[70]。

1 自诊断智能结构

时刻掌握结构性能可以针对性地制定运行策略,实现基于状态维护,对保障结构安全运行具有重要意义。因此需要针对航空航天结构的特点开发具有自诊断功能的智能结构。

目前的自诊断智能结构有以下3种:

(1) 埋入光纤的复合材料结构。

光纤传感器由于其诸多优点,如体积小、重量轻、抗电磁干扰、耐腐蚀、化学性能稳定、灵敏度高、集成性好、复用性强等特点,因此在航空航天结构健康监测方面得到了广泛的应用^[71]。基于光纤传感器的结构健康监测方法是利用光纤测得应变场变化以此来表征结构损伤以及载荷等情况^[72-73]。

常用的光纤传感器是光纤光栅传感器。布拉格光栅光纤传感器(FBG)是光栅光纤传感器最为典型的一种。布拉格光栅光纤具有轻质微小、测量精度高、响应时间短、抗干扰能力强、远程感应等优点。NASA在X-33计划中安装了测量应变和温度的光纤光栅传感网络,将其用于准分布式应变和氢浓度的测量,欧空局也将其作为重点的光纤传感器研究^[74],如图12是X-33航天飞机及其上面的光纤传感系统。

分布式光纤传感器也是基于光纤的结构健康监测上的一个重要分支^[75]。分布式光纤监测系统本质上是分布调制的光纤传感系统,是由激光光源、传感光纤和检测单元组成的自动监测系统^[76]。大连理工大学与西安飞机强度设计研究所共同开发基于分布式光纤传感器的结构状态实时感知系统,可以实时感知受载情况下复合材料翼稍小翼的应变场,如图13为其传感器安装形式及应变场感知结果^[77]。

基于光纤传感器的自诊断智能结构对于应变场重构已具有较高的技术成熟度和广泛的应用,并且适于应用在大面积结构监测。但是光纤传感器的使用受环境影响较大,尤其

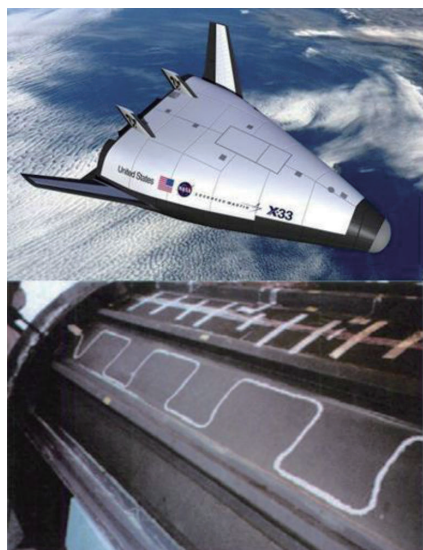


图12 X-33航天飞机及其上面的
光纤传感系统

Fig.12 X-33 and distributed optical fiber
sensor system

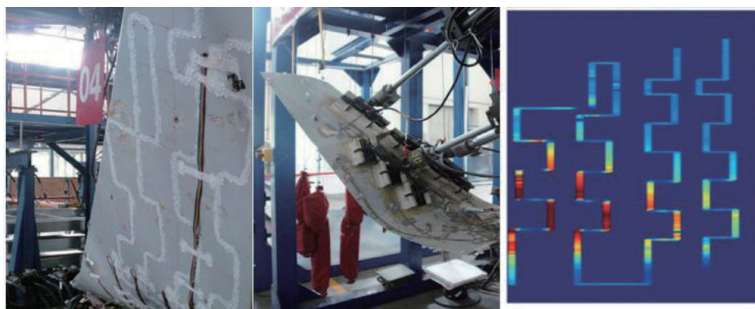


图13 复合材料翼稍小翼受载条件下状态感知

Fig.13 Condition perception of a composite winglet under loading

是航空航天领域所需的耐极端环境。对于航空航天背景下的环境,例如高温条件下,应进行环境因素补偿研究。

(2)集成声发射监测系统的复合材料结构。

材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性应力波的现象称为声发射(Acoustic Emission,简称AE)。这些瞬态弹性应力波信号很微弱,人耳听不到,必须借助先进的设备来检测。

声发射具有动态检验、适用于复杂构件、监测范围大、敏感性高等优点,广泛应用在航空航天领域,尤其是复合材料的监测^[78-80]。声发射可对活性缺陷(晶体材料塑性变形、断裂和复合材料基体开裂、纤维和基体脱开、纤维拔出、纤维断裂和纤维松弛等)随载荷、时间、温度等外变量而变化的实时或连续信息进行监测。图14所示即为声发射监测技术在航空航天曲面蜂窝夹层板上的健康监测应用。Chen等^[81]对飞行器整流罩在飞行过程中利用声发射机载系统进行损伤监测。Hensman等^[82]利用声发射监测技术实现对空客A320起落架的断裂、损伤识别和定位监测。Surgeon等^[83]开展了基于声发射监测技术的复合材料板在拉伸作用下的损伤研究,研究了各参数下不同铺层试件下的损伤演化和破坏机理。

声发射自诊断智能结构发展为成熟,但是在结构的可靠性和可

性方面仍需要继续开发研究,还需进一步开发发射信号处理分析技术和神经网络模式识别技术。

(3)集成超声导波监测系统的复合材料结构。

超声导波监测法具有传播距离远、易与结构集成实现在线实时监测,是目前国际结构健康监测技术的研究热点和前沿技术^[84]。超声导波监测是利用激发传感器在结构中激发超声导波,导波在结构中进行传播,由接收传感器对导波信号进行接收,再通过对接收到的信号进行处理分析得到结构的在线状态。

超声导波具有监测面积大、效率高、可检测多种损伤类型、可离线或在线监测等优点。超声导波不仅可以用于监测结构中腐蚀、疲劳损伤和裂纹损伤^[85],监测螺栓松动等连接状态^[86-87],还可以监测胶层破坏和脱粘^[73,88]。

大连理工大学结构健康监测团队开展了大量基于超声导波的结构健康监测技术的研究。在主动式损伤监测方面,与中国商飞北京民用飞机技术研究中心联合开展了多肋复合材料板的损伤定位(基于不同的损伤因子)的研究,探究了损伤诊断受激发频率的影响^[73,89],该试验能有效识别大于2cm²的模拟附着物损伤,损伤定位误差小于2cm。该团队与北京航空制造工程研究所合作,利用超声导波主动式损伤监测技术开展了ARJ-21全尺寸复合材料尾翼加载监测试验,研究了超声导波在复杂结

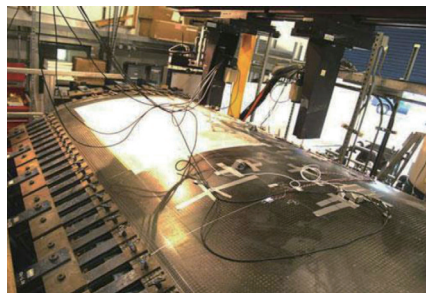


图14 曲面蜂窝夹层板的声发射监测

Fig.14 Acoustic emission monitoring system
of curved honeycomb sandwich plate

构中传播特性^[90-91],并基于超声导波的研究提出了各种监测方法,如复杂结构传感器网络优化^[92]、温度条件下复合材料的监测^[90]、局部多损伤诊断定位^[93]等。

在基于超声导波的健康监测工程化应用方面,斯坦福大学 Chang 教授与 Acellent Technologies, Inc. 合作开发了可集成压电传感器、温度传感器、湿度传感器的传感器智能层技术,形成一种轻质的可嵌入复合材料内部或粘接在结构表面的传感器网络智能层,为安装带来方便^[94-97]。如图 15 所示为其基本结构,分布式传感器可以安装到柔性结构上,且智能层除了易于安装到复杂结构上还有减少电磁噪声、与基体连接可靠、可嵌入结构内部等优点。

超声导波自诊断智能结构对于微小裂纹的损伤十分敏感,因此可以监测材料的疲劳裂纹、脱粘损伤、腐蚀等损伤。但是由于传感器布置的离散型使得监测系统对结构响应的提取具有一定程度的非均匀性,另外导波对环境的变化也比较敏感,因此需要开发适当的损伤诊断技术。

2 自修复智能结构

复合材料在航空航天领域中的应用日益增多,覆盖率已达 40%~80%^[98]。飞行器在使用寿命期限内,使用和维护费用高昂,高达 50%。而复合材料本身的二维平面结构决定了其抗冲击损伤性能差,飞行器在使用过程中受不利天气条件,降落过程中石头或者岩石对龙骨冲击维修时偶然触碰及鸟击等影响,会破坏复合材料完整性,在内部微观层面形成厚度方向(损伤容限能力最低)上的微裂纹和纤维和基体的分层,微裂纹一方面会联合扩展,另一方面还提供了污染物进入结构内部的通道,这样就大大降低了结构承载能力,影响其使用寿命。

复合材料损伤难以检测且修复困难,且常用的修补方法效果并不理想。

为了解决材料内部微裂纹难修复的问题,同时受到生物体损伤自愈机理的启发,自修复智能结构应运而生,成为目前研究热点问题^[99]。

自修复智能结构不仅能够对遭受冲击损伤以及疲劳破坏的结构进行自行判断、处理发生损伤的部位并恢复其性能,减少航天航空领域复合材料结构在损伤容限设计时增加的低效结构,使结构更加轻质高效,同时具有高强度、高韧性、自修复过程相对容易、成本低廉、维护费用较少、提高产品安全性、延长产品使用寿命及维护能力等特点,大大降低维修和检测等相关成本。但是对于自修复结构的实际应用较少,主要是现在对于自修复结构的可靠性以及极端环境的研究较少,需要加强这些方面的研究。

3 主动减振降噪智能结构

复合材料损伤难以检测且修复困难,且常用的修补方法效果并不理想。为了解决材料内部微裂纹难修复的问题,同时受到生物体损伤自愈机理的启发,自修复智能结构应运而生,成为目前研究热点问题。

国内外飞行器出现过多起由于振动和噪声引起的疲劳损伤现象^[100-103],飞行器减振降噪技术的研究非常重要。F/A-18 飞机在飞行时间不超过 1000h 就发生了后机身框段的振动疲劳损伤。对于该型号飞机振动问题,包括美国在内的多个国家开展了减振研究,主要是利用压电主动控制技术减少振动问题的产生。通过优化压电作动器配置来控制垂尾的振动,并通过试验测试了其应力应变状态。试验表明,对垂尾振动进行有效控制后,尾翼根部应变得有效的控制,研究中的一些试验情况如图 6 所示^[104]。德国空间中心针对 ARIANE 5 运载火箭开发了一种代替传统适配器的主动有效载荷隔振适配器,如图 16 所示^[105]。该适配器作用是将火箭有效载荷中的振动

隔离开,主要隔振类型包括升压器点火、增压器压力、振荡以及助推器分离等,可以在低频段内有效改善航天器载荷环境。

飞机在飞行阶段中会产生各种各样的噪声,这些噪声大多数来自飞机发动机。针对发动机降噪问题,古德里奇公司研制了用于波音 777 飞机短舱的复合材料消音衬垫^[106]。该消音衬垫为碳纤维增强环氧树脂基复合材料,为多层蜂窝夹层结构,如图 17 所示。

衬垫内表面存在拼缝是阻碍降噪的一大难题。赛峰集团旗下的埃

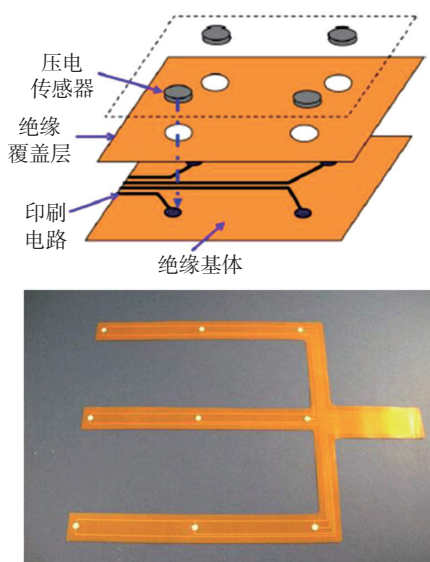


图 15 智能夹层结构
Fig.15 Smart layer structure

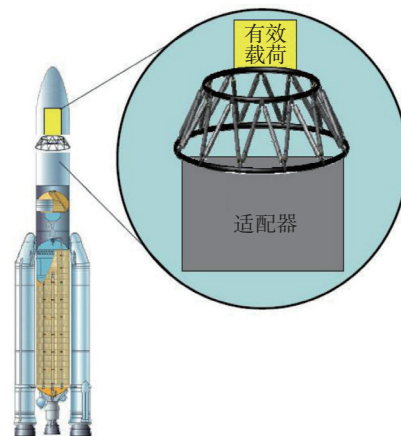


图 16 主动有效载荷适配器在 ARIANE 5 中安装

Fig.16 Piezo-loaded adapter in ARIANE 5

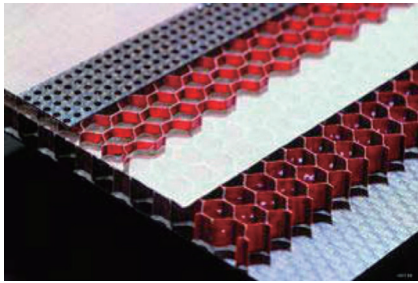


图17 复合材料消音衬垫
Fig.17 Composite acoustic panel

赛公司为空客 A380 研发的短舱内壁带有先进的消音衬垫,消音衬垫是由复合材料整体成型,衬垫内表面不存在拼缝,更为有效地阻止了噪声传播。这些吸音衬垫在飞机起飞过程中可降低发动机的噪声约 4~5dB,而降落过程中仍可以降低发动机的噪声约为 2dB^[106]。

飞行器振动与噪声控制一般运用于飞行器严重载荷部位及飞行器舱室内部容易产生振动或安装有精密仪器之处。包括飞行器发动机临近结构减振降噪,以此减少飞机振动疲劳损伤的发生;飞行器薄壁结构振动与噪声控制,以避免来自外界环境及内部器件的振动和噪声引起的结构疲劳、断裂等;舱内噪声控制,增大精密仪器的使用寿命、提高工作人员的安全性;火箭整流罩内部振动与噪声控制,以保护火箭有载荷以及内部精密仪器。

4 智能结构研究存在问题及展望

智能结构作为一个新兴的前沿学科,涉及到传感技术、微电子技术、驱动技术、信号处理技术等,涉及领域比较广,相对的开展研究难度较大,但其应用前景广阔。智能结构所具有的自诊断、自修复、减振降噪等能力对保障航空航天结构的安全性能有重要意义。

航空航天领域所需的智能结构通常需要在复杂的环境下使用,例如高温、低温、振动等,目前的光纤、压电等传感器需要在稳定的环境下使用,对于复杂环境,其使用需要进行环境补偿且容易发生失效;自诊断

智能结构需进一步开发信号处理分析技术已经比较成熟,但是神经网络模式识别技术还需进一步发展;自修复智能结构的研究目前还停留在实验室阶段,应发展可靠性评估体系,并进一步加强其使用的安全性能;主动减振降噪智能结构应该进行材料和结构的优化设计,降低噪声和振动,保证飞行器的安全性。

针对极端环境可靠性、变化环境因素补偿问题、结构和材料的安全性以及优化设计问题,未来智能结构发展主要在开发新型智能材料、设计新型传感器、发展有效环境补偿方法以及进行结构优化等方向发展。

结论

本文讨论了几种智能材料和智能结构的发展以及在航空航天领域的应用阐述。

对于智能材料来说,虽然性能优异,但是每种材料本身有其局限性。(1)在航空航天等许多工业和科研部门迫切需要能够在更高的温度下工作的电子设备,所以高居里温度压电材料是现在压电材料研究热点。(2)如何提高形状记忆材料的变形能力也是研究重点之一。(3)对于智能材料,其功能特殊化、复合化以及结构微型化将是研究的重点方向。

对于智能结构来说,其未来的应用前景主要集中在以下方面:(1)智能结构已经在航空航天领域有了较大的发展,但是实用价值还需要进一步开发,需要研究人员对智能材料进行改性、对智能结构进行优化,以此来满足对航空航天领域在线状态监测、减振降噪、自动修复等材料结构的需求,为其更广泛的应用提供技术基础;(2)随着智能材料和结构的不断发展,困扰飞行器实现自感知、自诊断、自驱动、自修复等功能的相关智能结构会逐步发展。智能结构的发展会推动航空航天结构向智能化方向发展,实现飞行器的减重提

效、减少维护成本、提高安全性等。

参考文献

- [1] 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.
- [2] DU Shanyi, ZHANG Boming. The overview of investigation of smart advanced composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002(9): 17-20.
- [3] 李山青,刘正兴. 压电材料在智能结构形状和振动控制中的应用[J]. 力学进展, 1999, 29(1): 66-76.
- [4] LI Shanqing, LIU Zhengxing. The application of piezoelectric materials on shape control and vibration control of smart structures[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(1): 66-76.
- [5] THOMPSON B S, GANDHI M V, KASIVISWANATHAN S. An introduction to smart materials and structures[J]. Materials & Design, 1992, 13(1): 3-9.
- [6] 裘进浩,边义祥,季宏丽,等. 智能材料结构在航空领域中的应用[J]. 航空制造技术, 2009(3): 26-29.
- [7] QIU Jinhao, BIAN Yixiang, JI Hongli, et al. Application of smart materials and structures in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(3): 26-29.
- [8] FLORANCE J P, BURNER A W, FLEMING G A, et al. Contributions of the NASA langley research center to the DARPA/AFRL/NASA/ Northrop grumman smart wing program[C]//AIAA Dynamics Specialists Conference. Norfolk: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- [9] 黄步红. 变形飞机开创飞行新纪元[J]. 新闻周刊, 2004(1): 62.
- [10] HUANG Buhong. Transforming plane start new century[J]. New Work, 2004(1): 62.
- [11] 马洪忠,彭建平,吴维,等. 智能变形飞行器的研究与发展[J]. 飞航导弹, 2006(5): 8-11.
- [12] MA Hongzhong, PENG Jianping, WU Wei, et al. Study and development of smart distortion vehicle[J]. Winged Missiles Journal, 2006(5): 8-11.
- [13] REY N, TILLMAN G, MILLER R M, et al. Shape memory alloy actuation for a variable area fan nozzle[J]. Smart Structures and Materials

2001: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 2001, 4332: 371–382.

[9] WLEZIEN R W, HORNER G C, MCGOWAN A M R, et al. Aircraft morphing program[C]//5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 1998.

[10] QIU J, WANG C, HUANG C, et al. Smart skin and actuators for morphing structures[J]. Procedia Iutam, 2014, 10: 427–441.

[11] SUN J, GUAN Q, LIU Y, et al. Morphing aircraft based on smart materials and structures: a state-of-the-art review[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2016, 27(17), doi:10.1177/1045389X16629569.

[12] MABE J, CALKINS F, BUTLER G. Boeing's variable geometry chevron, morphing aerostructure for jet noise reduction[C]//Proceedings of Smart Structures and Materials. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2006:199–210.

[13] 宋海洋, 于开平, 韩敬永. 大型运载火箭整流罩减振降噪问题研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2014(3): 16–19.

SONG Haiyang, YU Kaiping, HAN Jingyong. Noise and vibration reduction analysis of large launch vehicle fairing[J]. Missiles and Space Vehicles, 2014(3): 16–19.

[14] MCGOWAN A M R, WASHBURN A E, HORTA L G, et al. Recent results from NASA's morphing project[C]//International Symposium on Smart Structures and Materials. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2002, 4698: 97–111.

[15] 姚艳彬, 邹方, 刘华东. 飞机智能装配技术[J]. 航空制造技术, 2014(23/24): 57–59.

YAO Yanbin, ZOU Fang, LIU Huadong. Intelligent assembly technology of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(23/24): 57–59.

[16] 张定华, 罗明, 吴宝海, 等. 智能加工技术的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2010(21): 32–35.

ZHANG Dinghua, LUO Ming, WU Baohai, et al. Development and application of intelligent machining technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(21): 32–35.

[17] 符刚, 肖庆东, 荆道艳, 等. 智能制造技术在飞机部件数字化装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2014(S1): 5–8.

FU Gang, XIAO Qingdong, JING Daoyan, et al. Application of intelligent manufacturing technology in aircraft part digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(S1): 5–8.

[18] 刘俊聪, 王丹勇, 李树虎, 等. 智能材料设计技术及应用研究进展[J]. 航空制造技术, 2014(1): 130–133.

LIU Juncong, WANG Danyong, LI Shuhu, et al. Design technology and application advance of intelligent material[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(1): 130–133.

[19] 屠光峰, 李志强. 压电元件的高温、高稳定性性能研究[J]. 航空制造技术, 2008(22): 76–79.

TU Guangfeng, LI Zhiqiang. Research on high temperature and high stability of piezoelectric element[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(22): 76–79.

[20] QING X P, BEARD S J, KUMAR A, et al. The performance of a piezoelectric-sensor-based SHM system under a combined cryogenic temperature and vibration environment[J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(5): 055010.

[21] HARRISON J S, WISE S A, BRYANT R G, et al. Innovative materials for aircraft morphing[C]//Proceedings of the 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 1998.

[22] GAO D, WANG Y, WU Z, et al. Design of a sensor network for structural health monitoring of a full-scale composite horizontal tail[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(5): 055011.

[23] GAO D Y, WU Z J, WANG Y S, et al. Influence of bonding quality for piezoelectric sensors with applications to Lamb wave damage detection[C]//Proceedings of the applied mechanics and materials. Zurich: Trans Tech Publications, 2013.

[24] BOHANNAN G W, SCHMIDT V H, CONANT R J, et al. Piezoelectric polymer actuators in a vibration isolation application[C]//Proceedings of the SPIE's 7th annual international symposium on smart structures and materials. Bellingham: International Society for Optics and

Photonics, 2000.

[25] KRANZ M, ALLEN M G, HUDSON T. In situ polarization of polymer films in microsensors[C]//Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2012.

[26] COCHRAN W. Crystal stability and the theory of ferroelectricity part II. Piezoelectric crystals[J]. Advances in Physics, 1959, 3(40): 412.

[27] 向炼, 陈刚, 符春林, 等. 超高温压电陶瓷研究进展[J]. 中国陶瓷, 2013, 49(7): 1–5.

XIANG Lian, CHEN Gang, FU Chunlin, et al. Recent progress of ultrahigh temperature piezoelectric ceramics[J]. Chinese Ceramics, 2013, 49(7):1–5.

[28] SHROUT T R, EITEL R, RANDALL C A, et al. New high temperature morphotropic phase boundary piezoelectric ceramics[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 2003.

[29] ZHANG S, EITEL R E, RANDALL C A, et al. Manganese-modified BiScO₃-PbTiO₃ piezoelectric ceramic for high-temperature shear mode sensor[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(26): 262904.

[30] YAO Z, LIU H, LIU Y, et al. Morphotropic phase boundary in Pb(Sc_{1/2}Nb_{1/2})O₃-BiScO₃-PbTiO₃ high temperature piezoelectrics[J]. Materials Letters, 2008, 62(29): 4449–4451.

[31] JIANG Y, ZHAO Y, QIN B, et al. Dielectric and piezoelectric properties of (1-x)(Bi_{1-y}Li_y)(Sc_{1-y}Sb_y)O₃-xPbTiO₃ high-temperature relaxor ferroelectric ceramics[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(2): 022904.

[32] JAFFE B. Piezoelectric ceramics[M]. London: Academic Press, 1971.

[33] ZHANG S, XIA R, LEBRUN L, et al. Piezoelectric materials for high power, high temperature applications[J]. Materials Letters, 2005, 59(27): 3471–3475.

[34] MAIER R, HOFFMANN F, TEWES S, et al. Active vibration isolation system for helicopter interior noise reduction[C]//Proceedings of the AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference & Exhibit. Breckenridge: 2002: 283–298.

- [35] CHERNYSHOV A, OVERBY M, LIU X, et al. Evidence for reversible control of magnetization in a ferromagnetic material by means of spin-orbit magnetic field[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(9): 656-659.
- [36] YUAN F D, SIU W R. Self-sensing tunable vibration absorber incorporating piezoelectric ceramic-magnetostrictive composite sensor/actuator[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011(8): 085007.
- [37] WILLARD M A, LAUGHLIN D E, MCHENRY M E, et al. Structure and magnetic properties of $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{88}\text{Zr}_7\text{B}_4\text{Cu}_1$ nanocrystalline alloys[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84(12): 6773-6777.
- [38] PATTERSON D, MONTI A, BRICE C W, et al. Design and simulation of a permanent-magnet electromagnetic aircraft launcher [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41(2): 566-575.
- [39] MONNER H P. Realization of an optimized wing camber by using formvariable flap structures[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2001, 5(7): 445-455.
- [40] FENN R C, DOWNER J R, BUSHKO D A, et al. Terfenol-D driven flaps for helicopter vibration reduction[J]. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5: 49-57.
- [41] 殷青英, 翁光远. 智能材料在结构振动控制中的应用研究 [J]. *科技导报*, 2009(12): 93-97.
- YIN Qingying, WENG Guangyuan. Applications of intelligent materials in structural vibration[J]. *Science & Technology Review*, 2009(12): 93-97.
- [42] 冷劲松, 刘立武, 吕海宝, 等. 形状记忆聚合物基复合材料在航空航天领域的应用 [J]. *航空制造技术*, 2012(18): 58-59.
- LENG Jinsong, LIU Liwu, LÜ Haibao, et al. Applications for shape-memory polymer composites in aerospace[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012(18): 58-59.
- [43] 李军府, 艾俊强, 董海锋. 飞机变形技术发展探究 [J]. *航空科学技术*, 2009(2): 3-6.
- LI Junfu, AI Junqiang, DONG Haifeng. Research on the development of aircraft morphing technologies[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2009(2): 3-6.
- [44] 张玉红, 严彪. 形状记忆合金的发展 [J]. *上海有色金属*, 2013, 33(4): 192-195.
- ZHANG Yuhong, YAN Biao. The development of shape memory alloys[J]. *Shanghai: Nonferrous Materials*, 2013, 33(4): 192-195.
- [45] REED D, HERKES W, SHIVASHANKARA B, et al. The Boeing quiet technology demonstrator program[C]//*Proceedings of the 25th International Congress of the Aeronautical Sciences*, 2006.
- [46] CLAEYSSSEN F, LHERMET N, LE LETTY R, et al. Actuators, transducers and motors based on giant magnetostrictive materials[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 1997, 258(1-2): 61-73.
- [47] 王凤翔, 张庆新, 吴新杰, 等. 磁控形状记忆合金蠕虫型直线电机研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(7): 140-144.
- WANG Fengxiang, ZHANG Qingxin, WU Xinjie, et al. Study on inchworm linear motor of magnetically controlled shape memory alloy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(7): 140-144.
- [48] BEHL M, LENDLEIN A. Shape-memory polymers[J]. *Materials Today*, 2007, 10(4): 20-28.
- [49] YU K, YIN W, SUN S, et al. Design and analysis of morphing wing based on SMP composite[C]//*Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [50] DERAEMAERKER A, NASSER H. Numerical evaluation of the equivalent properties of macro fiber composite (MFC) transducers using periodic homogenization[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2010, 47(24): 3272-3285.
- [51] BENT A A. Active fiber composites for structural actuation[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [52] SODANO H A, PARK G, INMAN D J. An investigation into the performance of macro-fiber composites for sensing and structural vibration applications[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004, 18(3): 683-697.
- [53] CHEN Y, VIRESH W, ZIMCIK D. Development and verification of real-time controllers for F/A-18 vertical fin buffet load alleviation[C]//*Proceedings of the Proceedings of SPIE*. Bellingham: The International Society for Optical Engineering, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2006.
- [54] NAN C W, BICHURIN M I, DONG S, et al. Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(3): 031101.
- [55] DAI X, WEN Y, LI P, et al. Modeling, characterization and fabrication of vibration energy harvester using Terfenol-D/PZT/Terfenol-D composite transducer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 156(2): 350-358.
- [56] ZHU Y, ZU J W, GUO L. A magnetoelectric generator for energy harvesting from the vibration of magnetic levitation[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11): 3344-3347.
- [57] 马立. 形状记忆复合材料的最新研究进展 [J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(5): 11-16.
- MA Li. Recent progress in shape memory polymer composites[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2013, 43(5): 11-16.
- [58] TAMAGAWA H. Design and processing of shape memory polymer (SMP)/shape memory alloy (SMA) composites[J]. *Design & Processing of Shape Memory Polymer*, 2010, FA23860914033.
- [59] CHEN S, HU J, ZHUO H. Properties and mechanism of two-way shape memory polyurethane composites[J]. *Composites Science & Technology*, 2010, 70(10): 1437-1443.
- [60] CAMPBELL D, RORY B, LAKE M S, et al. Development of a novel, passively deployed roll-out solar array[C]//*Aerospace Conference*. IEEE, 2006.
- [61] LIN J K, AGNES G S, ABELSON R D, et al. Ultra lightweight isogrid boom space experiment (ultraboom) systems design[C]//*Proceedings of the 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2005.
- [62] IM E, THOMSON M, FANG H, et al. Prospects of large deployable reflector antennas for a new generation of geostationary Doppler weather radar satellites[C]//*Proceedings of AIAA SPACE 2007 Conference and Exposition*. Long Beach, 2007.
- [63] 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.
- [64] PATRICK J F, HART K R, KRULL

- B P, et al. continuous self-healing life cycle in vascularized structural composites[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(25): 4302–4308.
- [65] WHITE S R, SOTTOS N R, GEUBELLE P H, et al. Autonomic healing of polymer composites[J]. *Nature*, 2001, 409(6822): 794–797.
- [66] 朱孟花. 微胶囊自修复复合材料的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- ZHU Menghua. Study on preparation and performance of microcapsule composite materials for self-healing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [67] DRY C M. Smart building materials which prevent damage or repair themselves[C]// *Proceedings of the MRS Proceedings*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [68] GHOSH S K. Chapter 1. Self-Healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications[M]. Weinheim: Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [69] TRASK R S, WILLIAMS G J, BOND I P. Bioinspired self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2007, 4(13): 363–371.
- [70] 梁大开, 杨红. 采用空心光纤自诊断、自修复智能结构的研究[J]. *压电与声光*, 2002, 24(4): 261–263.
- LIANG Dakai, YANG Hong. Research on self-diagnose and self-repair net in smart composite structure by hollow-center optic fiber[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2002, 24(4): 261–263.
- [71] 张博明, 郭艳丽. 基于光纤传感网络的航空航天复合材料结构健康监测技术研究现状[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2014(1): 33–42.
- ZHANG Boming, GUO Yanli. Survey of aerospace structural health monitoring research based on optic fiber sensor networks[J]. *Journal of Shanghai University(Natural Science Edition)*, 2014(1): 33–42.
- [72] SILVA L F M D, MOREIRA P M G P, LOUREIRO A L D. Determination of the strain distribution in adhesive joints using Fiber Bragg Grating (FBG)[J]. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2014, 28(14–15): 1480–1499.
- [73] 刘科海. 飞行器关键构件的超声导波损伤诊断成像方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- LIU Kehai. Damage diagnostic imaging using ultrasonic guided waves for key components in aerospace structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [74] BODAN P, BOUVIER C. X-33/RLV reusable cryogenic tank VHM using fiber optic distributed sensing technology[C]// *Proceedings of 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conference and exhibit*. Long Beach, 1998: 1865–1870.
- [75] GRAVE J H L, HEIM M L, ECHTERMEYER A T. Measuring changing strain fields in composites with distributed fiber-optic sensing using the optical backscatter reflectometer[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 74(1): 138–146.
- [76] 魏德荣, 赵花城, 秦一涛, 等. 分布式光纤监测技术在中国的发展[J]. *贵州水力发电*, 2005(1): 7–9.
- WEI Derong, ZHAO Huacheng, QIN Yitao, et al. Development of supervision technique using distribution light fiber in China[J]. *Guizhou Water Power*, 2005(1): 7–9.
- [77] 武湛君, 渠晓溪, 高东岳, 等. 航空航天复合材料结构健康监测技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2016(15): 92–102.
- WU Zhanjun, QU Xiaoxi, GAO Dongyue, et al. Research progress on structural health monitoring technology for aerospace composite structures[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(15): 92–102.
- [78] SUNG D U, KIM C G, HONG C S. Monitoring of impact damages in composite laminates using wavelet transform[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2002, 33(1): 35–43.
- [79] JOHNSON M, GUDMUNDSON P. Broad-band transient recording and characterization of acoustic emission events in composite laminates[J]. *Composites Science & Technology*, 2000, 60(15): 2803–2818.
- [80] BOHSE J. Acoustic emission characteristics of micro-failure processes in polymer blends and composites[J]. *Composites Science & Technology*, 2000, 60(8): 1213–1226.
- [81] CHEN C C, LEE J R, PARK C Y. Radome health management based on synthesized impact detection, laser ultrasonic spectral imaging, and wavelet-transformed ultrasonic propagation imaging methods[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(8): 2898–2906.
- [82] HENSMAN J, WORDEN K, EATON M, et al. Spatial scanning for anomaly detection in acoustic emission testing of an aerospace structure[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(7): 2462–2474.
- [83] SURGEON M, VANSWIJGENHOVEN E, WEVERS M, et al. Acoustic emission during tensile testing of SiC-fibre-reinforced BMAS glass-ceramic composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(5): 473–480.
- [84] RAGHAVAN A, CESNIK C E S. Review of guided wave structural health monitoring[J]. *The Shock and Vibration Digest*, 2007, 2: 91–114.
- [85] KOSTSON E, FROMME P. Fatigue crack growth monitoring in multi-layered structures using guided ultrasonic waves[C]// *Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2009, 195: 1–10.
- [86] YANG J, CHANG F K. Detection of bolt loosening in C-C composite thermal protection panels: I. Diagnostic principle[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(2): 581–590.
- [87] YANG J, CHANG F-K. Detection of bolt loosening in C-C composite thermal protection panels: II. Experimental verification[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(2): 591–599.
- [88] LOWE M, CAWLEY P. The applicability of plate wave techniques for the inspection of adhesive and diffusion bonded joints[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1994, 13(4): 185–200.
- [89] WU Z, LIU K, WANG Y, et al. Validation and evaluation of damage identification using probability-based diagnostic imaging on a stiffened composite panel[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2014, doi: 10.1177/1045389X14549873.
- [90] GAO D, WANG Y, WU Z, et al. Damage extension diagnosis method for typical structures of composite aircraft based on lamb waves[J]. *Structural Durability & Health Monitoring*, 2013, 9(3): 233–352.
- [91] GORGIN R, WU Z, GAO D, et al. Damage size characterization algorithm for active structural health monitoring using the A0 mode

- of Lamb waves[J]. Smart Materials & Structures, 2014, 23(3): 035015.
- [92] GAO D, WANG Y, WU Z, et al. Design of a sensor network for structural health monitoring of a full-scale composite horizontal tail[J]. Smart Materials & Structures, 2014, 23(5): 055011.
- [93] GAO D, WU Z, YANG L, et al. Guide waves-based multi-damage identification using a local probability-based diagnostic imaging method [J]. Smart Materials & Structures, 2016, 25(4): 045009.
- [94] QING X P, BEARD S J, IKEGAMI R, et al. Aerospace applications of smart layer technology[M]//Encyclopedia of Structural Health Monitoring. Hoboken: Wiley, 2009.
- [95] QING X P, BEARD S J, KUMAR A, et al. Stanford multi-actuator-receiver transduction (smart) layer technology and its applications[M]//Encyclopedia of Structural Health Monitoring. Hoboken: Wiley, 2009.
- [96] QING X P, BEARD S, PINSONNAULT J, et al. SmartComposite system for impact damage detection on composite structures[C]//Proceedings of the Proc of SPIE, 2009.
- [97] QING X P, IKEGAMI R, BEARD S J, et al. Multifunctional sensor network for structural state sensing[C]//Proceedings of the Proc of SPIE, 2010.
- [98] 杨红. 空心光纤用于智能结构自诊断、自修复的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.
- YANG Hong. Research on self-diagnose and self-repair in smart structures by hollow-center optical fiber[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001.
- [99] 陈凤, 林超, 袁莉, 等. 热固性聚合物基复合材料自修复技术研究进展 [J]. 化工新型材料, 2011, 39(11): 19-21.
- CHEN Feng, LIN Chao, YUAN Li, et al. Research progress in self-repairing thermosetting polymer composite materials[J]. New Chemical Materials, 2011, 39(11): 19-21.
- [100] 郑旭东, 张连祥. 航空发动机整机振动典型故障分析 [J]. 航空发动机, 2013, 39(1): 34-37.
- ZHENG Xudong, ZHANG Lianxiang. Typical failure analysis of aeroengine vibration[J]. Aeroengine, 2013, 39(1): 34-37.
- [101] 王琰, 郭定文. 航空发动机转子叶片的声振疲劳特性试验 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(11): 2738-2743.
- WANG Yan, GUO Dingwen. Experiment on acoustic vibration fatigue properties of the aero-engine rotor blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(11): 2738-2743.
- [102] 梁德利, 于开平, 韩敬永. 高速飞行器振动噪声环境预示技术 [J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(5): 58-63.
- LIANG Deli, YU Kaiping, HAN Jingyong. Advances in noise and vibration environment prediction of high speed spacecrafts[J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(5): 58-63.
- [103] 王京发. 卫星振动隔离系统的隔振与控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- WANG Jingfa. The study of isolation and control for the vibration isolation system of the satellite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [104] GALEA S, HENDERSON D, MOSES R, et al. Next Generation active buffet suppression system[C]//AIAA International Air and Space Symposium and Exposition: The Next 100 Years. Dayton: AIAA, 2003.
- [105] CLAEYSSSEN F, GROHMANN B, CHRISTMANN M, et al. New actuators for aircraft and space applications[C]//Proceedings of the 11th International Conference on New Actuators. Bremen, 2008.
- [106] 宋旻键, 舒卫国, 祖力军. 复合材料在短舱降噪结构中的应用 [C]//第 17 届全国复合材料学术会议, 2012.
- SONG Minjian, SHU Weiguang, ZU Lijun. Application of composites in noise reduction nacelle[C]//17th National Conference on Composite Materials, 2012.

通讯作者: 高东岳, 博士后, 研究方向为结构健康监测, E-mail: dygao@dlut.edu.cn。

Advance of Aerospace Smart Material and Structure

YANG Zhengyan¹, ZHANG Jiaqi¹, GAO Dongyue^{1,2}, LIU Kehai¹, WU Zhanjun¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology,

Dalian 116024, China;

2. Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, Stanford, CA94305, USA)

[ABSTRACT] As the newly developing functional material, smart material has become the important material and has the broad application prospects in aerospace engineering. Smart structure is the integration of smart material as actuators and sensors in structural components. The goal of this integration is the creation of a material system having the ability of self-sensing, self-diagnosis, self-actuating and self-healing. Smart structure can adapt to the change of environment and improve the performance of modern aircraft. Smart material and structure has become the research focuses in aerospace field. In this paper, the comprehension review is made of the state of smart material and structural systems. Finally, some existing problems in this field are pointed out and the development trend of smart material and structure in aerospace field is presented.

Keywords: Smart material; Smart structure; Self-diagnosis; Piezoelectric material; Shape memory material

(责编 海山)