

应用于机载光电设备的 新型材料综述

Review of New Type Material of Aircraft Photoelectricity Equipment

中航工业空空导弹研究院光电设备事业部 芦丹 夏军



芦丹

博士研究生,研究方向为机电一体化技术。

机载光电设备是飞机最基本的任务执行单元之一。机载光电系统技术的提高相应大大地提高了各类飞机的作战使用性能。通过光电系统及内在的光电传感器可对战区进行侦察、监视、目标捕获及识别、目标测距、武器投放的目标指示、作战效果评估,战场障碍物探测、核生物和化学的探测和取样等等。

随着光电技术和数字技术的飞速发展,无人机机载光电系统的性能将有质的飞跃:探测距离将大幅度增加;灵敏度和分辨率将更高;重

随着对机载光电系统性能指标要求的提高,单一的合金类材料已不能满足高端设备的需求。以复合材料、智能材料为代表的新材料正逐步进入光电设备应用领域,并发挥着越来越重要的作用。

量将更轻;体积将更小;这必将对应用于机载光电设备的材料提出更高的要求^[1-5]。

当前航空设备常用的合金材料主要有铝合金、镁合金、钛合金等。而铝合金类材料由于其质量轻、刚度高、价格便宜、易加工等特点,在机载光电设备中已有较为广泛的应用基础。但正如前文所述,随着对机载光电系统性能指标要求的提高,单一的合金类材料已不能满足高端设备的需求。以复合材料、智能材料为代表的新材料正逐步进入光电设备应用领域,并发挥着越来越重要的作用。

复合材料的应用特性

复合材料最初在飞机上的应用较为广泛,尤其是在无人机的设计上,这在美国最先进的“全球鹰”中

体现得最为明显。目前国内外无人机的发展趋势是单个无人机覆盖范围的扩大和持续续航能力的增强,这就需要减少无人机的能耗,况且受到能源短缺和高油价影响,降耗还可以极大地减少日常飞行成本。

飞机结构减重是实现降耗提效的主要途径。先进复合材料在综合性能上与铝合金相当,但比刚度、比强度都高于铝合金,其轻质高强的特征正是实现减重目标的有力保证。在新一代波音787上,复合材料的用量从过去占全机结构的10%提高到50%,使用部位也从尾部扩展到主要承力结构的机身和机翼。欧洲空客超大客机复合材料结构用量达到25%,军用运输机A400M和空客A350复合材料用量也达到40%。随着复合材料在航空航天领域应用的

逐渐深入,复合材料的应用已经不限于飞机本身,在机载设备中也开始逐步见到了它的身影^[6]。

先进复合材料的高比强、高比模、耐高温、耐腐蚀、耐疲劳、阻尼减震性好、破损安全性好、性能可设计等优势已为世人所共识。与传统材料相比,复合材料具有如下特点^[7]。

(1) 可设计性和各向异性。

复合材料的力学、机械及热、声、光、电、防腐、抗老化等性能都可按照构件的使用或服役环境条件要求,通过组分材料的选择和匹配以及界面控制等材料设计手段,最大限度地达到预期的目的,以满足工程结构设计的使用性能,同时由于复合材料具有各向异性和非均匀性,可以通过合理的设计消除材料冗余,最大程度发挥材料及结构的潜力和效率。

(2) 材料与结构一体化。

复合材料构件与材料是同时形成的,一般不再由“复合材料”加工成“复合材料构件”,结构的整体性更好,大幅度减少了零部件和连接件数量,从而缩短了加工周期,降低了成本,提高了可靠性。

(3) 复合效应。

复合材料是由各组分材料经过复合工艺形成的,但它不是几种材料的简单混合,而是按照复合效应形成地新的性能,这种复合效应是复合材料特有的,通过复合效应,复合材料可以克服单一材料的某种性能缺陷。

(4) 材料性能对复合工艺的依赖性。

复合材料结构在形成过程中有组分材料的物理和化学变化,因此构件的性能对工艺方法、工艺参数、工艺过程等依赖性较大,同时也由于在成形过程中很难准确地控制工艺参数,使其性能的分散性较大。

(5) 多功能性和发展性。

复合材料组成的多样性和随意

性为复合材料具有除力学性能以外的许多功能(如声、光、电、磁、热等)创造了条件,使复合材料拥有吸波、透波、耐热、防热、隔热、导电、记忆、阻尼、摩擦、阻燃、透析等功能,同时与其它先进技术相结合,如与纳米技术结合发展的纳米复合材料;与生物、医学科学相结合发展的生物复合材料;与微机电、控制、传感技术等相结合发展的智能复合材料等;赋予了先进复合材料新的内涵。

表1为常用金属材料与碳纤维复合材料性能比较。由该表可知,碳纤维复合材料的密度是上述材料中最小的,而弹性模量及拉伸强度都是较高的,因此在同样的强度及变形设计指标的要求下,复合材料的质量最轻,从而达到减轻重量的目的。

光电设备应用于机载环境所使用的材料必须满足相对应的环境要求,下面主要介绍碳纤维复合材料(CFRP)类的环境特性。

温度环境:适用范围为高温不高于800℃,低温暂不限制。

湿度环境:碳/环氧复合材料层合板,在潮湿环境中可吸收高达1.5%的水分,实际主要是复合材料

冲击环境:复合材料尤其是纤维增强树脂性复合材料属于脆性材料,其应力-应变关系近似直线。在过载下,内力重新分配的能力差,甚至在较小的冲击载荷作用下,也可能造成内部分层损伤,这种损伤会降低结构的刚度和强度,其抗压缩强度的降低更显著。在受冲击区,表面看来零件损伤不明显,但其内部已产生分层损伤,这也是复合材料缺乏永久变形能力造成的,这将提高其检测与维修的成本。

除了上述环境要求外,复合材料还有综合成本、检测方式^[8]、构件方式等方面的问题需要注意。首先碳纤维的材料成本较普通合金材料呈现了大幅度的增加,因此不光要考虑其使用费用的减少,还要综合考虑材料费用增加的影响;其次在复合材料构件的设计上,外形尺寸要求平滑,平面或圆弧面皆可,如果有较大的拐角则会大幅降低材料的性能;最后为保证材料构件的完整性,复合材料检测需采用无损检测技术,但目前尚未有具体应用于检验光电设备复合材料的标准与方法,需在使用中逐步探索与完善。

表1 常用材料与复合材料性能比较

材料	密度 / (g·cm ⁻³)	拉伸强度 / GPa	弹性模量 / GPa	比强度 / [GPa/(g·cm ⁻³)]	比模量 / [GPa/(g·cm ⁻³)]
钢	7.8	1.03	210	0.13	27
铝合金	2.8	0.47	75	0.17	26
钛合金	4.5	0.96	114	0.21	25
碳纤维复合材料	1.45	1.5	140	1.03	97

之间的粘结剂环氧树脂吸湿,吸湿后降低了树脂的某些机械特性,如高温压缩强度。

振动环境:复合材料的铺层特性使得材料内部阻尼较高,利于减振。

低气压:目前试验结果表明低气压下复合材料的力学特性较稳定。

复合材料在光电设备中的应用与展望

文献[9]从探讨碳纤维复合材料的性能出发,研究了碳纤维复合材料作为空间遥感仪器结构件采取的预埋技术措施;结合某空间遥感仪器采用的碳纤维复合材料具体结构,

给出了预埋件的几种结构形式;采用预埋措施设计制备了框架式碳纤维复合材料结构件并进行了试验验证。试验过程中支架承受的最大加速度为 20.4g, 试验后支架完好无损。

北京空间机电研究所陆续开展了卫星、运载火箭、宇宙飞船等航天器结构复合材料成型技术的研究, 研制生产了相机镜筒、支承杆(座)、遮阳罩、反射镜基等结构, 还曾经采用非连续碳化硅增强铝基复合材料(SiCp/Al) 制造空间相机的镜盒和镜身^[10]。认识和处理好复合材料成型技术方面的问题, 是扩大新型复合材料在航天器光学传感器类结构中的应用和推动复合材料结构成型技术发展的关键^[11]。

北京航空材料研究院则采用无压浸渗复合方法制备了用作空间光机结构件的高体份 SiC/ Al 复合材料^[12]。另外还有多种树脂基碳纤维复合材料还被用来制造空间相机的遮光罩、镜筒、底板^[13-14]。

文献[15]从实际应用角度出发, 设计并研制了由碳纤维复合材料构成的在大口径空间光学传感器中连接高精度主、次镜的精密连接筒, 对其建立了等效力学模型, 计算了相关参数和确定了铺层的合理形式, 利用有限元法对连接筒进行了分析计算, 通过试验和光学测量方法验证了连接筒的结构稳定性。试验和检测结果表明, 主、次镜之间的碳纤维复合材料精密连接筒具有较好的结构稳定性。

随着空间技术的发展和轻质复合材料的牵引, 碳纤维复合材料作为结构件开始逐步应用于空间光学传感器结构中^[16-17]。

20世纪90年代开始, 国外已经尝试将碳纤维复合材料用来制作空间光学镜体;20世纪90年代后期, 美国 NASA 戈达德宇航中心经过深入的研制工作, 用碳纤维复合材料制作出了表面粗糙度小于 1nm、面密

度小于 2000g/m² 的光学镜面。采用碳纤维复合材料制造的镜面精度高、质量轻, 具有极好的动力学特性, 对空间光学传感器具有极为重要的意义。对减轻质量和可设计性而言, 碳纤维复合材料是最具发展和应用潜力的先进材料^[18-19]。

综上所述, 复合材料在光电设备中其应用的应用主要还是体现在单体零件方面, 而在整个设备中其应用的所占比例还是较小。由光电设备的具体构成来看, 可考虑将复合材料使用在如风阻外壳等此类非主要结构受力件上, 这样其增加的设计及材料成本较小, 应用风险性也会降低, 而且能起到明显的减重效果。

随着复合材料在光电设备中的广泛应用, 可逐步提高其结构比重, 最终达到可代替部分合金材料地位的目的。

需要指出的是, 前述复合材料主要介绍的是碳纤维类复合材料, 因为和常用合金相比较, 它的比刚度及比强度性能最为优越。实际上随着材料科学的不断发展与进步, 还有一大批新型复合材料(例如 P P S 等)正逐步迈入工程领域, 可望在不远的将来步入航空航天等产业。

智能材料简介

智能结构将生命体的感知、调整、控制等功能赋予传统的工程结构, 使之能感知外界环境并自发地进行调整, 从而自动适应各种外部作用, 以实现工程结构的智能化。它具有选择功能、自我诊断功能、自我调节功能、自我恢复功能及自我修复功能。

智能结构的研究始于 20 世纪 80 年代, 美国政府首先开展了此方面的研究, 80 年代末期以来, 智能结构已经有了长足的进展, 以美、日、德、英为代表的发达国家投入大量的人力、物力和财力, 用于该领域的研究与探索。我国也十分重视智能材

料和结构这一新兴学科的研究, 国家自然科学基金等从 1993 年起每年都将智能结构列入研究计划项目, 一些高等院校与研究所已开展了这方面的研究工作, 其研究大部分集中在对各种不同的智能材料特性的探索上, 并研制出了多种具有不同特点的智能材料。

在航空领域中, 翼面形状的自适应控制对提高升力、临界速度、改善飞机机动性等方面有重要意义。自适应结构在空间站和其它空间飞行器中也具有重要的应用价值, 通过其变形控制可以调整结构的几何形状, 维持结构准确的外形和位置, 保证空间天线反射器望远镜等精密仪器的工作, 这些都需要智能材料来完成^[20-22]。根据智能材料的类型, 该类致动机构可分为六大类: 压电陶瓷致动器、音圈电机、磁致伸缩致动器、形状记忆合金致动器、电致伸缩致动器、静电微致动器。

接下来主要介绍众多智能材料中运用得较为广泛的一种材料—压电材料。

压电材料的特性

压电材料所特有的压电效应是在 1880 年由法国的 Pierre-Curie 和 Jacques-Curie 两兄弟发现的。他们发现: 当对石英晶体在某些特定方向上加力(拉或压)时, 在力方向的垂直平面上会出现正、负束缚电荷。这种现象后来即被称为压电效应。压电效应的出现是由于晶体在机械力的作用下发生形变, 引起带电粒子的相对位移(偏离原来的平衡位置), 继而导致正负电荷重心不重合(即晶体的总电极矩发生变化)而造成的。晶体是否具有压电性是由晶体本身的结构决定的, 结构上具有对称中心的晶体永远不具有压电性。

由于在压电材料表面施加电压后会产生形变性能, 它的机电耦合特性使其在结构的智能化和振动控制

中得到了广泛的应用。

压电材料主要有压电晶体、压电纤维、压电陶瓷和压电聚合物等几类,目前应用最多的是压电陶瓷和压电聚合物。

压电材料具有正压电效应和逆压电效应,其频响范围较宽,使得压电材料在用于智能结构时,既可作为传感元件,又可作为驱动元件。压电材料的压电效应有较好的线性关系,便于测量和控制,压电材料的制备技术也日趋完善和成熟。

目前压电陶瓷材料,比如PZT材料,广泛应用于各种传感器(Sensors)和致动器(Actuators)中,用于产生精确的位移、声音,以及用于振动测量和主动控制。压电陶瓷极化后变形与电场的关系如图1所示。以压电陶瓷做成的许多种器件都已实用化,如压电超声换能器、压电陶瓷点火装置、陶瓷滤波器、压电变压器、压电电机等^[23-24]。

由于应用领域的扩大,会进一步对材料提出新的要求,而这些发展又会更进一步扩大新的应用。智能材料的研制和应用之间的相互促进,大大推动了这些材料的发展。

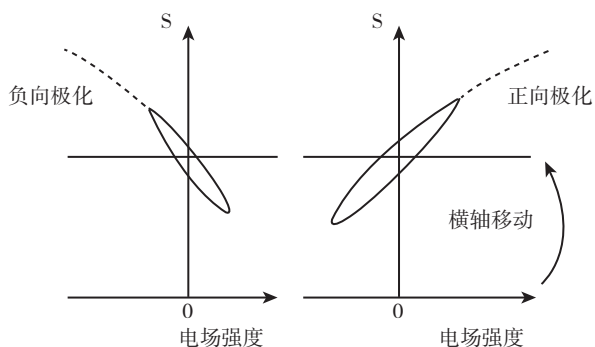


图1 压电陶瓷极化后变形与电场的关系

压电材料在光电设备中的应用与展望

压电器件应用于光电侦察设备,主要具有下列优点。

分辨率高,目前压电陶瓷的位移分辨率级为 μm 级;响应速度快,压

电陶瓷的响应时间在毫秒级别;结构设计灵活多变、可操作性强,可根据具体的结构功能与尺寸要求设计压电陶瓷的安装位置,可设计成直线型或旋转型运动,比如说镜头附近的扭转与摆动调节镜头姿态,镜头底座的纵向运动抵消振动,不受常规驱动器结构类型的限制。

压电陶瓷在光电侦察设备中的应用,主要有以下两方面。

一是精确定位^[25-26]。微位移技术作为精密机械的关键技术之一,近年来随着微电子技术、宇航、生物工程等学科的发展而迅速地发展起来。由于宇航和航空等技术的发展需要,对实现小范围内偏转的支承不仅提出了高分辨的要求,而且对其尺寸和体积也提出了微型化的要求。特别是对于机载光电平台来说,定位的精确性直接影响到成像的清晰度和跟踪的稳定性。压电工作台由于其高的定位精度和稳定性,在各种微纳米定位系统中发挥着至关重要的作用。压电陶瓷致动器主要有以下几种结构形式:叠堆型压电陶瓷、薄板型压电陶瓷、管型压电陶瓷和双晶片型压电陶瓷。在超精密定位

中应用的最多是叠堆型,它是采用多片压电陶瓷片粘结而成,可以承受很大的压力,刚度大,但承受拉力的能力有限。德国PI公司的商用PS150/14/40VS20型压电陶瓷致动器,其驱动电压为 $0 \sim 150\text{V}$,名义输出位移 $40\mu\text{m}$,最大推力可达到 7000N ,空载频率响应 20KHz ,分辨率 0.1nm 。目前PI与NANON公司平台的定位精度已达到纳米级别。

二是振动的主动控制。近些年来,振动的主动控制方法发展很快,

主要采用压电片、压电堆作为作动器/传感器来进行控制。通过电信号将结构数据实时采集、数据的实时处理反馈到作动器上,从而实现振动控制。由于主动控制具有可设计性,针对性强、适应范围宽,尤其是在低频段具有很好的效果,非常适合仪器安装平台的减振要求。目前光电设备中使用的是被动隔振,其使用较为方便,但是从目前使用结果看,其在某些固定频段会有放大振幅(目前常出现在低频段)。而利用压电陶瓷进行主动隔振,其隔振的频段可以由压电陶瓷完成振动的主动控制,与被动减振相结合,以达到全频段减振的效果。

当然,将压电材料应用于机载光电设备目前还有很多实际的问题需要解决。比如说,压电器件的材料特性容易受到温度等环境因素的影响,由于航空产品所处的环境较常态下更为恶劣,压电材料很容易出现温漂现象,甚至有时会失效,这就一方面需要加强压电材料本身的温度稳定性,另一方面可考虑利用环境控制等方式减少外界环境因素的干扰。另外由压电材料本身的特性即作用力大位移小所限制,为了提高压电器件的位移,通常需要增大激励电压,而此时压电材料很容易出现断裂等器件损坏现象,这也是为什么越来越多的压电器件采用层叠式结构的原因。

结束语

以上介绍了新型复合材料与智能材料的发展状况,归纳和总结了其在光电设备中的应用背景。可预见在未来的光电设备中,新型材料势必会占有更大的比重,发挥越来越来越重要的作用。

本文共有参考文献26篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 泰山)