

中国宇航学会
中国力学学会
中国航空学会

第六届全国复合材料 会议论文集



DILIUJIE QUANGUO FUHECAILIAO
HUIYI LUNWENJI

PDG

前 言

第六届全国复合材料学术交流会议于1990年11月在北京召开。这次会议由中国宇航学会委托航空航天部第七〇三所承办。会上交流的学术论文从广度和深度上都有了显著的提高，反映出近几年来我国在先进复合材料科学领域，取得了进展并达到了新的水平。

本届会议的论文选编包括树脂基、陶瓷基、金属基复合材料以及力学研究、性能测试等计198篇和论文摘要40篇，其中包括特邀国内有关专家为本论文集撰写的论文9篇。为便于排印装订，论文集分为一、二、三集出版。第一集包括特邀报告和纤维增强树脂基复合材料；第二集包括金属基、陶瓷基、碳基复合材料和复合材料性能测试；第三集包括复合材料力学研究和论文摘要。本论文集对从事复合材料研究、设计、生产、测试、情报、教学、使用等人员来说是一本很好的参考资料，具有一定的实用价值。

由于财力和人力的限制，难以将全部来稿录取，有的即使录取，也不得不压缩篇幅。本论文集在审稿、编辑、出版过程中得到了有关主管领导和兄弟部门的关心和支持，论文作者也给予了热情合作，《宇航材料工艺》编辑部的同志们付出了辛勤的劳动，在此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促，论文集中难免出现错误和问题。请专家、读者批评指正。

主编 胡连成

1990年11月

目 录

特邀报告

先进复合材料的现状和展望·····	曹汉民 (1)
复合材料在军事上应用研究现状与展望·····	赵稼祥 (5)
金属基复合材料的进展·····	吴人洁 (10)
复相陶瓷·····	郭景坤 (15)
航天用复合材料的应用研究现状与展望·····	王曼霞 (21)
我国先进复合材料树脂基体的发展·····	宋焕成 (28)
人工结构化材料的力学行为的研究方法·····	顾正隆 (34)
复合材料损伤与断裂研究进展·····	沈 真 (39)
复合材料设计及《复合材料设计手册》·····	陈绍杰 (44)

纤维增强树脂基复合材料

6K、12K高强碳纤维PAN原丝的研制·····	陈光大 刘明旭 (48)
Si-N-C纤维的研制·····	宋永才 赵 银 周慧霞 (54)
热处理对CVD法SiC纤维强度的影响·····	石南林 常新春 全 荣 夏 非 (57)
热固性树脂的刚性增韧——环氧-聚砜体系的断裂韧性及其增韧机理 ·····	殷立新 王凤处 (60)
中温固化树脂基体的研究·····	舒武炳 马蕊然 宁荣昌 王汝敏 (63)
双马来酰亚胺型复合材料树脂基体的研究——浇注体的性能····· ·····	宁荣昌 金绪刚 马蕊然 (67)
双马来酰亚胺型复合材料树脂基体的研究——复合材料的性能 ·····	王汝敏 马蕊然 宁荣昌 舒武炳 (70)
环氧丙烯酸酯改性双马来酰亚胺树脂的研究·····	舒武炳 马蕊然 (73)
双马来酰亚胺基体树脂的研究——双马来酰亚胺/烷基取代双马来酰亚胺/二 乙烯苯体系·····	蓝立文 吕通健 梁国正 雷渭媛 (76)
5223高温阻燃树脂体系研究·····	唐美珍 周金凤 陈 燕 (79)
3252阻燃环氧树脂体系及其复合材料·····	朱 红 王晓蔚 (83)
玻璃纤维、芳纶纤维对改善碳纤维复合材料冲击特性的作用·····	张佐光 宋焕成 (87)
PMR型聚酰亚胺固化工艺研究·····	李建军 王幼甫 (93)
碳/环氧卫星接口支架的研制·····	陈 铮 朱达通 (97)

CZ-2E分离弹簧支架的研制	蒋 穗 陈 铮 朱达通 (99)
碳/环氧水平梁研究	冯翠雅 (102)
碳/环氧蒙皮-耐久铝 蜂窝夹层结构研究	蒋元兴 (107)
软模法成型复合材料与热胀硅橡胶性能试验	肖少伯 史慧慧 (110)
复合材料的毒性和防护	裘镜蓉 (113)
压缩性能——结构复合材料面临的问题	曹昭焕 (116)
纤维-树脂界面对芳纶纤维压力容器性能的影响	钟铭安 顾星若 (119)
CF/PMR-15复合材料的界面研究	张志谦 程浩川 郭子海 魏月贞 (122)
固体火箭发动机全复合材料喷管工艺研究	苏兴祥 (126)
铺层顺序对连接强度影响的实验研究	谢鸣九 施丽中 朱立平 (129)
模式识别技术在FRP模压质量控制中的应用研究	章绎民 孙国庆 范世达 (131)
飞机雷达罩用TDE-85环氧树脂/酸酐复合材料固化工 艺研究	 谢基明 张明习 梁主宇 (134)
改性聚丙烯酸酯类透光玻璃钢的研制	梁根海 刘雄亚 (139)
脱层层板中的脱层扩展	邹振民 季宇寅 樊蔚勋 (142)
环氧树脂/聚硅氧烷IPN的制备	吕满庚 朱彬桢 (146)
不同表面状态的芳纤增强环氧基复合材料固化过程的研究——固化行为、三 T状态图及固化反应动力学分析	孙慕瑾 胡宝荣 田学文 贺 泓 朱鹤孙 (149)
纤维配置与组分材料性能对聚合物基纤维增强复合材料蠕变性能的影响	 吴代华 江冰 (153)
碳纤维增强混杂基体 (PEEK/PES-C) 复合材料的摩擦磨损特性	 张志毅 曾汉民 (160)
热塑性塑料及其增强塑料的粘弹性	沈叔曾 万友生 (163)
歼7M机复合材料垂尾设计研究	王绍俭 (166)
正交各向异性多层夹层板理论	龚志钰 冯广占 程 山 (169)
复合材料结构多位移约束的气动剪裁设计	陈嘉友 (176)
碳纤维/环氧复合层板脱层破断的断口微观特征与断裂韧性的关系	 吴庆记 李重庵 (181)
层板锯齿形边缘抑制分层技术的实验研究	李思简 李建文 (187)
聚苯硫醚及其玻璃纤维增强复合材料性能的研究	许砚琦 张保平 包筱梅 (190)
碳/环氧复合材料的层间断裂	史建立 赵时照 陈昌麒 (193)
电磁屏蔽聚合物复合材料	吴鑫森 (197)
聚合物基复合材料的高频介电性能研究——复合材料夹层结构的高频介电 性能	 伍必兴 (200)
混杂纤维复合材料吸波特性初探	 宋焕成 张佐光 伍必兴 (203)
单向复合材料的湿膨胀	唐羽章 江大志 (206)
机翼复合材料整体油箱设计研究	赵建华 (209)
碳纤维/聚苯硫醚复合材料复合工艺及力学性能的研究	 张随山 包筱梅 许砚琦 张保平 (212)

新型双酚A环氧树脂基体固化工艺参数的研究·····	仲伟虹	宋焕成	张佐光 (216)
液晶聚合物及其复合材料·····	王惠民	益小苏	(219)
倾斜功能复合材料·····	甘永学	陈昌麒	王俊奎 (222)
计算机辅助复合材料固化工艺控制(DDA法)的研究·····	伍必兴		(224)
混杂复合材料的吸湿行为研究·····	李宏运	宋焕成	张佐光 (228)
复合材料加筋板载荷参与规律的研究和参与区的铺层设计·····	马祖康	董志毅	(231)
复合材料结构可靠性优化设计方法·····	羊 玲	马祖康	(235)
复合材料夹芯“抗噪音-受力融合体”结构研究·····	朱 明	陈锡安	(238)
复合材料层板干涉配合螺接强度估算和试验研究·····	石彩华	张开达	(242)

先进复合材料的现状和展望

曾汉民

(中山大学材料科学研究所)

材料是人类社会科技进步的物质基础和先导,现代高技术的发展更紧密地依赖于新材料的发展。80年代以来,在国际上开展着争夺高技术优势的激烈竞争,新材料在整个高技术发展中的先导和基础作用更加日趋明显,新材料的研究开发已成为当代高技术的重要组成部分,因此,各国在发展高技术计划中对新材料的研究开发都给予充分重视和优先安排。作为单一的金属、陶瓷、有机高分子材料,虽然仍在不断日新月异地发展,但是这些单一的材料由于各自固有的局限性而不能满足高技术发展的要求。现代材料科学技术的发展,促进了金属、非金属无机材料和高分子材料之间日趋密切的关系,彼此可以通过“扬长避短”的多种多样的不同层次范围的复合,如:作为分散相的纤维或颗粒的尺寸可在 μm 水平以上的宏观复合材料、尺寸控制在 nm 水平上复合制得的称之为纳米复合材料、尺寸控制在 $\text{\AA}$ 级的原子或分子水平上复合制得的称之为杂化材料。此外,还研究开发了宏观-微观复合为一体的各种新型复合材料。通过不同质和不同性能材料复合后的叠加效应和乘积效应可制得增强、增韧或功能化的新型复合材料。这样的复合材料比单一材料具有更优良的综合性能,以满足现代高技术发展对材料性能越来越高的要求。因此,复合材料的研究深度和应用的广度及其生产发展的速度和规模已成为衡量一个国家科学技术先进水平的重要标志之一。

随着高技术的迅猛发展,特别是航空航天工业及宇宙空间和海洋开发事业的发展,对材料性能提出越来越高的要求。因此,作为高性能结构材料用的先进复合材料的要求主要从高比强、高比模、耐高温等性能来区别于通用的或第一代的玻璃钢复合材料,而且先进复合材料的应用将越来越占更大的比例。这类先进复合材料主要是由各种高性能增强材料(纤维、晶须、颗粒)与树脂、金属、陶瓷、碳基体复合而成的宏观复合材料。然而,为了解决不同材料之间界面的相容性和粘结以及界面应力的缓和或消除界面有害的化学反应,必须合理设计最佳的界面层(组合、结构、性能),界面层往往又是一种微观复合设计(此界面微区复合线度可处于 nm 、原子、分子水平)。因此,当前先进复合材料往往是不同组分、结构、性能的异种材料,要求宏观-微观复合整体设计,才能达到最佳的优良综合性能。特别是作为使用环境温度差很大(上千度)的热结构材料,更需要这种合理的界面层微观复合的设计。例如,80年代后期出现的所谓功能梯度材料(Functionally Gradient Material,简称FGM)解决陶瓷/金属复合材料界面热应力的缓和。这种作为超耐热材料的FGM既有金属材料的断裂韧性又有陶瓷的耐热性与耐热冲击性能。这种复合材料界面层组分、结构和性能的梯度化,可以减轻陶瓷/金属异种材料间界面区域各类性能的突变,消除界面热应力的集中而不导致发生开裂或

剥离。又如由高性能有机纤维(Kevlar)树脂的复合材料与铝合金板交叠铺层热压而成的非金属材料/金属材料复合而成的所谓ARALL超混杂复合材料,以及当前正在发展着的各种多功能-结构复合材料也都必须精心研究界面层微观复合的合理设计问题。另一方面,在先进复合材料领域里,当前人们还越来越注意到微观复合材料(nm、原子、分子水平)作为新型结构或功能材料。在微观复合材料中,界面状态特征同样对其性能有很大影响。因此,当前,先进复合材料的概念应从不同材料之间的宏观复合,进一步扩展为宏观-微观复合为一体或微观复合,以得高性能的结构、功能-结构或特种功能的先进复合材料(国外某些学者称功能梯度复合材料为最先进复合材料)。

本文将扼要讨论先进复合材料所用的各类高性能增强材料的发展趋势、无机和有机纤维增强材料各自的特性以及发展过程中彼此的相互关系。重点讨论碳纤维类:迅速发展的趋势——高强度化、高模量化、高强-中模-高应变化及赋予各种特别优异的性能(如抗高温氧化性、高导热和低电阻、低热膨胀系数、低纤度等);陶瓷纤维类:碳化硅(SiC)纤维、氮化硼(BN)、氮化硅(Si_3N_4)纤维、硼纤维、氧化铝纤维等及其颗粒或晶须;高性能有机纤维:聚芳酰胺类的Kevlar系列纤维,聚苯撑苯并二噻唑PBT(或PBZT)纤维、聚苯撑苯并二噻唑(PBO)纤维和超高分子量聚乙烯纤维Spectra等的结构和性能特征。当前各种牌号不同品种的高性能纤维增强材料日新月异,为满足复合材料不同基体和不同使用要求提供了更多的选择性。

本文将扼要讨论先进复合材料领域中,依据不同使用要求而迅速发展起来的各类基体的发展趋势;论述先进复合材料所用各种高性能纤维对高性能基体如树脂、金属、陶瓷和碳基体的要求。纤维增强树脂基复合材料(首称FRP或PMC)领域将着重讨论高性能热固性树脂(PI系列)、高性能热塑性树脂(PEEK、PPS、PES、PEI等系列)以及热致液晶高聚物(LCP'S)和半互穿网络高聚物(Semi-IPN'S)等基体的各自特性和存在问题;不同温度下使用具有优良综合性能的复合材料对树脂基体耐热级别的要求($150^\circ\sim 200^\circ\text{C}$ 、 $200^\circ\sim 250^\circ\text{C}$ 、 $250^\circ\sim 350^\circ\text{C}$)及其工艺成型特点和存在问题。为使复合材料具有优良的综合性能:使用性能——成型工艺——成本的最佳平衡匹配,而开展采用混杂纤维(Hybrid Fabres)或混杂基体(Hybrid Matrices)的混杂复合材料(Hybrid Composite)。为此,这里将着重讨论树脂基体的改性方向,及称之为原位复合材料(In Situ Composite)和分子复合材料(Molecular Composite)等有关问题,讨论当前正在发展中的高性能热塑性树脂基体复合材料成型工艺特点及其尚待解决的问题。

为适应高技术发展要求,正在迅速研究开发能适用于 $350^\circ\sim 1200^\circ\text{C}$ 使用的、由各种陶瓷纤维、晶须(或颗粒)增强的各种金属基复合材料(FRM或MMC)。金属基复合材料所用金属基体除轻金属(Al、Mg)外,还发展有色金属(Cu、Zn、Pb、Be等)、超合金和金属间化合物、黑色金属等作为金属基体。为了制得具有优良综合性能的金属基复合材料,正在开展的各种复合工艺都特别注意研究MMC形成过程,纤维/金属基体界面状态特征(浸润性、界面化学反应、物理结构等)及其最佳界面层的合理设计。随着高技术的发展,陶瓷材料耐高温、抗氧化、高温强度高、抗高温蠕变性好,高硬度、耐磨损性能好,热膨胀系数小和耐化学腐蚀等固有的优异性能越来越为人们所重视。然而,陶瓷材料的脆性使其经受不起强烈的机械冲击和热冲击而限制其应用范围。为此,人们曾通过控制晶粒或相变韧化方法以改善其韧性。但是,采用相复增韧往往在高温下失去增韧效果。因

此,采用纤维或晶须补强增韧陶瓷基复合材料(PRC或CMC)是高新技术新材料发展中前沿课题。与PMC和MMC相比,CMC具有更好的耐高温综合性能,CMC将适用于 $1200^{\circ}\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 作为耐高温、高强度、耐腐蚀、高韧性的结构材料。目前正在积极研究开发的CMC有 CF/SiC 、 $\text{CF}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 CF/SiO_2 、 SiC/SiC 、 $\text{SiC}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{BN}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 等。必须指出,CMC和MMC复合成型过程都在高温和加压下进行,因此,往往会发生纤维/基体之间有害的界面反应,为此,当前人们着重开展改善纤维/基体之间相容性的纤维表面处理和界面层设计的研究;寻求具有高温化学稳定的新体系;研究新的低温复合工艺技术。

碳纤维增强碳基复合材料(C/C)不仅是一类优良的烧蚀型防热材料和耐高温耐摩擦磨损材料,而且经SiC涂层处理的C/C可作为具有高温抗氧化的热结构材料。随着航天技术和先进防御技术发展的要求,兼具双功能或多功能的复合材料正在迅速发展,如兼具有隔热、抗核辐射、抗激光、吸收雷达波、抗超高速碰撞及粒子云侵蚀等双功能或多功能。为此,C/C、C/SiC、SiC/SiC等陶瓷基复合材料作为结构-多功能一体化的新材料越来越引起人们的重视和深入研究。

80年代后期发展起来的功能梯度复合材料及精细功能复合材料是一类有发展前途的具有战略意义的先进复合材料的前沿课题正在引起人们的极大关注。

在现代材料科学技术领域里从人们比较熟悉的宏观复合材料至正在兴起的精细功能复合材料及杂化材料等复合体系都有一个表面和界面科学研究的前沿课题,正在吸引着多种学科的科技工作者深入研究。异质材料复合线度的量值不同(毫米、微米、纳米、分子、原子水平),材料的表面特性和复合的界面特征等对复合材料性能有很大影响,而且复合工艺条件对其界面特征也有深刻的影响。为此,人们以极大的注意力开展复合体系中材料的表面和界面微区的研究和设计(统称为复合材料的表面和界面工程Surface and Interphase Engineering),以求制得具有最佳综合性能的复合材料。

本文将着重讨论纤维(或颗粒)增强树脂、金属、陶瓷和碳基复合材料的表面和界面工程的进展及其存在问题。这类宏观复合材料的制备工艺过程,往往总是经历着纤维或颗粒(固相)和基体液体(溶液或熔融体)的界面效应。这些固-液界面效应(化学、物理、物理-化学)和所制得复合材料中固-固界面效应的特征,取决于纤维或颗粒表面的物理和化学状态、基体本身的结构和性能、复合工艺条件、复合方式和几何结构及环境条件等,而复合材料的界面效应特征对其性能和破坏行为及应用效能有很大影响。因此,复合材料的表面和界面工程的研究任务是试图通过对纤维或颗粒的表面处理或选择适当的基体或引入某种界面调节剂,以便有利于改善纤维或颗粒与基体之间的相容性和粘结,而且形成有利于界面应力松弛的界面层,以及选择最佳复合工艺以求达到预定的界面微区设计,制取具有更优异综合性能的复合材料。通过选择不同的纤维或颗粒和不同的基体,采用不同的复合工艺和复合方式,合理设计界面层和控制界面效应特征,所得复合材料不仅在力学性能和环境适应性方面,而且在热、电、光、磁、声等功能方面给材料和制件结构设计人员提供更大的可调节性,以满足各种实际应用的要求。必须指出,具有不同结构(化学和物理)和性能的两或多种材料复合过程,出现的界面热应力(导热率、膨胀系数不同)及界面化学效应(官能团之间作用或形成新的化合物)和界面结晶效应(成核诱发界面结晶)等所引起的界面应力效应等微观结构和性能特征,

将直接影响复合材料的力学性能和物理功能。通常在复合材料中界面层的厚度在亚微米以下，但界面层的面积在整体复合材料中占有很大比值。因此，依据不同材料的复合基体，借助界面层的微观复合使组分、结构和性能的梯度渐变，以减少或消除界面应力，将大大提高复合材料性能。当前高性能纤维或颗粒增强的先进复合材料正是采用宏观-微观复合技术，促进各类高性能结构复合材料、结构-功能复合材料或多功能复合材料日新月异地发展。然而，这里的表面和界面的显微分析和表征（结构和性能）是很复杂的，特别是界面微观力学和物理功能的表征更为困难。为此，还有待于更精确的显微分析技术的发展，才能更好地解决复合材料表面和界面工程中急待解决的问题。

为了迎接80年代以来国际上争夺高技术优势的挑战，增加我国的综合国力，振兴中华，我国制定了“高技术研究发展计划纲要”，并把新材料列为我国高技术发展的重要领域之一，这是非常必要和正确的战略决策。高技术新材料领域的基本任务是发展高技术关键新材料和现代材料科学技术。为此，依据“瞄准前沿、积极跟踪”和“有限目标、突出重点”的方针。本领域为相关高技术领域提供支撑性的关键新材料，应注意长远的战略要求和阶段效益的发挥，军民结合，立足国内已有基础和发挥国内优势，以及与其它计划的协调、分流和衔接。在通过对国内外新材料的发展作了充分调研论证后，我们在高性能结构材料中重点发展为航天技术服务的先进复合材料，其内容包括高性能增强剂（纤维、晶粒、颗粒），高性能树脂基、金属基和陶瓷基复合材料，以及为航天防热系统服务的热结构复合材料。此外，对金属/非金属材料复合新技术及某些特种制备技术和特种加工方法，检测评价新技术及数据库，以及当前材料科学技术领域发展的前沿之一的精细功能复合材料作为纳米复合光电子材料也作了必要的部署。为先进防御技术服务的多功能复合材料作了某些探索性研究安排。

当前国际上各类先进复合材料正在迅速发展，特别一些发达国家正在联合研究开发为航天技术和宇宙空间开发及先进防御技术服务的最先进的复合材料。我国在先进复合材料方面虽有一定基础，但许多方面仍有较大差距，为此，必须群策群力，不失时机，精心组织，大力协同，密切合作，共同努力为发展我国先进复合材料科技事业作出最大贡献。

复合材料在军事上应用研究现状与展望

赵稼祥

(国防科工委军用新材料应用研究专业组)

复合材料具有高比强度、高比模量,而且材料性能根据要求可以设计,是一种理想的结构材料。它的抗烧蚀性好,抗热应力破坏与抗热冲击性好,经过专门的制备还具有卓越的吸波隐身、零膨胀系数、阻尼减振等特性,因此也是极好的功能材料。正因为这样,复合材料在军事上获得愈来愈广泛的应用。国外有人称复合材料为“第三代宇航材料”,也有人称“21世纪是复合材料的世纪”。

一、武器系统对复合材料的要求

复合材料的发展实际上影响着每一种新的武器系统。战略导弹、战术导弹、固体火箭发动机、卫星、高性能歼击机、新一代坦克、潜艇以及战略防御系统等的研制与发展都离不开复合材料技术。当前和未来武器系统对复合材料的要求,可概括为以下十点:

1. 高比强、高比模。要求复合材料的比强度和比模量在现有基础上进一步提高,满足武器系统小型化以及减轻结构重量、增加有效载荷等要求。

2. 耐高温。要求复合材料的使用温度进一步提高,包括树脂基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料,因此必须解决新的树脂体系、新的金属基体和金属间化合物基体、新的陶瓷基体以及抗氧化等问题。

3. 防热与隔热。要求复合材料满足各种不同类型再入飞行器在再入大气时的温度、压力、热流、热量、过载等的要求,因此必须研究高性能碳/碳复合材料、超低密度烧蚀材料,多次重复使用复合材料和其他防热、隔热复合材料。

4. 吸波隐身。要求复合材料具备减小武器系统被电磁波、红外、声波、可见光探测发现的特性,从而提高武器系统的生存率,增强突防能力。

5. 全天候。要求复合材料在任何气候条件下可以生存,包括天然与人工诱发的粒子云环境下生存的能力,保证武器系统免受作战危害及高级威胁。

6. 高抗破甲、抗穿甲性。研制具有高抗破甲与抗穿甲能力的复合装甲,进一步提高防护系数,增加坦克的生存能力,满足坦克装甲防护技术发展的需要。

7. 减振、降噪。要求复合材料能够消除或降低武器系统在点火、工作、运行中所产生的严重的振动和噪声,确保武器系统的稳定性、隐蔽性、精度和命中率。

8. 抗激光、抗定向能。激光武器和粒子束定向能武器的发展,要求复合材料具备抗激光和抗粒子未定向能武器的能力。

9. 多功能。要求复合材料不仅仅作为结构、防热、隐身、抗核加固……单一功能的材料,而是具备结构/防热、结构/隐身、结构/防热/隐身……双功能、三功能、甚至更

多功能的材料。

10.可靠性。要求用新的理论、概念、方法、工艺、检测、质量控制、技术等来研制复合材料及其构件，确保复合材料在军事应用上的可靠性。

二、复合材料在军事上应用的现状

从60年代以来，复合材料在军事上的应用取得了很大进展，在各种武器系统中获得广泛应用。作为结构材料，复合材料取代金属材料后，可以使武器系统的结构重量减轻20%~40%。复合材料已经从初期用于非承力件（壁板、舱门、口盖等）、次承力构件（垂直尾翼、水平尾翼、副翼等）发展到用于主承力件（机翼、机身等）。作为功能材料，在防热、介电、隐身、复合装甲等方面获得推广应用，并且已经由单功能向多功能方向发展。总之，用复合材料已研制成一系列典型构件，并成功地用于各种武器系统。典型的有：

1. MX导弹的石墨/环氧复合材料发射筒，内径2.49m，厚4.2cm，长14.05m，重7246kg，是用复合材料制造的最大构件之一。

2. B-1B飞机的下机翼蒙皮，长14.94m，宽2.44m，厚度从0.5~6.35cm，重量957kg，是由石墨/环氧复合材料制成的典型主承力构件。用复合材料取代铝合金制造，每架飞机可以减轻重量1914~2392kg。

3. 三叉戟Ⅰ（C-4）的一、二、三级固体火箭发动机壳体全部采用K-49芳纶/环氧复合材料，性能比玻纤/环氧有很大提高。三叉戟Ⅱ（D-5）一、二级，侏儒导弹的一、二、三级固体火箭发动机壳体采用IM-7碳纤维/HBRF-55A树脂，容器效率达到 $4.3 \times 10^6 \text{cm}$ ，比K-49芳纶/环氧的 $3.3 \times 10^6 \text{cm}$ 提高了30%。

4. “民兵-Ⅲ”、“MX”导弹均大量采用复合材料作为烧蚀防热材料，包括：三向细编和针刺细编碳/碳复合材料作为鼻锥材料；碳/酚醛复合材料作为弹头大面积防热材料；2D和3D碳/碳复合材料作为喷管喉衬材料。

5. 复合材料广泛用于各种雷达天线罩，作为介电材料。像美国波音公司CH-46直升飞机用芳纶纤维复合材料，可减轻重量28.5%。法国用芳香杂环制成雷达天线罩，在400℃时介电性能仍然稳定。

6. 1938年11月22日，美国空军首次展出B-2隐身轰炸机和隐身巡航导弹。采用具有隐身性能的先进复合材料，是兼备隐身和结构双重功能的先进复合材料。

7. 各国主战坦克都已装备了复合装甲，象英国的“乔巴姆”、美国的“MI”西德的“豹Ⅱ”、以色列的“梅卡瓦”等，新型复合装甲在保持面密度为2.9的情况下，抗穿甲能力为530~540mm，抗破甲能力为880~950mm。

8. 各国反水雷舰艇艇体材料多采用复合材料，利用复合材料的无磁性、吸振降噪、耐腐蚀、透电磁波和声波以及密度小、强度高等特点。如英国用复合材料单板加筋结构制成排水量625/725t、长度60m、“Hunt”级猎扫雷艇。

9. 金属基复合材料用于杆式动能弹弹体材料，80年代初就进行了钨丝增强钛合金、钨丝增强铜合金、高密度钨基复合材料等试验，以满足动能弹和大细长比超速脱壳穿甲弹对材料提出的苛刻要求。

10. 在铀同位素分离技术中，复合材料被广泛用于离心机，与马氏体时效钢离心机

相比,复合材料离心机可大幅度提高单机的分离能力。80年代以来,日本每年化费几十亿日元研制复合材料离心机,采用复合材料离心机的浓缩铀成本比马氏体时效钢离心机降低约40%。

三、复合材料在军事上应用研究的经验与特点

根据复合材料在军事上应用研究的发展与历史来看,可总结归纳出以下经验与特点。

1. 复合材料在军事上的应用研究有专门的研制计划并拨给专门经费。70年代,为了研究战略导弹用的耐热复合材料,美国有“ABRES”、“REVMAT”等计划,每年经费4~5千万美元。80年代有研制复合材料大型机翼结构的“CLAWS”计划、先进设计的复合材料飞机“ADCA”计划。根据“ADCA”计划,复合材料将占飞机结构总重的68.5%,并使整个结构重量减轻35%。1989年美国国防部关键技术计划中“高温、高强度、轻重量复合材料”是重要内容之一,1990年财政年度拨给研制经费达1.1亿美元。

2. 重视复合材料用增强纤维的研制,不断提高性能,改进质量,研制出更高性能的增强纤维材料。以碳纤维为例,国外作为复合材料增强纤维用得最普遍的T300碳纤维,1972年抗拉强度为2.45GPa,1987年同样是T300碳纤维,抗拉强度已提高到3.53GPa。新的高性能碳纤维不断研制成功并投入生产,象超高强度碳纤维T1000,抗拉强度达7.06GPa。断裂延伸率2.4%;超高模石墨纤维P120抗拉模量达830GPa;高强中模碳纤维T-40,抗拉强度5.67GPa,抗拉模量290GPa;高模高强MJ系列,M60J的抗拉模量590GPa、抗拉强度亦高达3.8GPa。其他象抗氧化、低纤度、高导热和低膨胀等特殊性能碳纤维都已研制开发,而芳纶纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维也不断提高发展,为复合材料在军事上应用奠定了坚实的基础。表1是复合材料用的典型增强剂的性能。

3. 在不断提高复合材料树脂基体使用温度同时,注意综合性能,重视发展热塑性树脂基体。70年代,在航天、航空等军事上应用的复合材料,树脂基体是以MY720为代表的多官能团环氧树脂体系,包括Narmco 5208、Hercules 3501、Fiberite 934等。为了提高复合材料的使用温度,大力研究耐高温树脂基体,聚酰亚胺是主要研究对象,包括:NR-150、LARC160、PMR-15等,使用温度达到316℃,最近又推出PMR-I,使用温度高达371℃。但聚酰亚胺存在工艺性差、成品率低、孔隙率高等缺点。近年来国外大力研究开发以双马来酰亚胺为基的树脂体系,象5245C、5250、XU292、RD85-101等。这些树脂体系耐热性高,其固化物的 T_g 为200~400℃,耐湿性、高温强度都比环氧树脂体系好,而工艺条件与环氧树脂体系接近,可以沿用环氧树脂体系的工艺装备,是复合材料在军事上应用极有前途的树脂基体。复合材料用热塑性树脂基体发展很快,已制成用热塑性树脂基体的复合材料战斗机前机身示范件,其中聚醚醚酮(PEEK),聚苯硫醚(PPS)、聚醚砜(PES)和聚砜(PS)的发展令人注目。热塑性树脂基体的主要优点是可修复性、韧性、低吸湿性和再成型能力,但也存在成型温度与压力高、没有合适溶剂、工装昂贵等问题。

4. 十分重视“质量”,对性能表征、质量控制进行了大量研究工作,对原材料、半成品、缺陷、性能、方法等都有严格要求,并制订了统一标准或规范。从70年代中末期开始,美国空军、海军、陆军、宇航局以及从事复合材料研制、生产、应用的公司、工

表 1 复合材料用典型增强剂的性能

名 称	生产单位	抗拉强度 (MPa)	抗拉模量 (GPa)	断裂伸长 (%)	密 度 (g/cm ³)	备 注
T300	日本东丽	3530	235	1.50	1.76	PAN基碳纤维
T400H	日本东丽	4500	250	1.80	1.80	
T800	日本东丽	5590	294	1.90	1.80	
T1000	日本东丽	7060	294	2.40	1.81	
T40	日本东丽	5670	290	1.90	1.81	
T650/42	美国阿美科	5030	290	1.70	1.78	
AS-4	美国赫克里士	3641	231	1.52	1.78	
AS-6	美国赫克里士	4255	244	1.66	1.82	
IM-6	美国赫克里士	4850	307	1.66	1.82	
IM-7	美国赫克里士	5880	274	1.90	1.82	
Celion G40X	美国塞拉尼斯	9467	641	1.70	1.82	
Thornol T700	美国联合碳化物	8919	488	1.80	1.82	
Thornol T40	美国联合碳化物	10200	530	1.70	1.82	
M40J	日本东丽	4400	390	1.10	1.77	
M50J	日本东丽	4000	490	0.80	1.87	
M60J	日本东丽	3800	590	0.70	1.94	
P-100	美国阿美科	2455	766	—	2.16	沥青基石墨纤维
P-120	美国阿美科	2240	830	—	2.18	
K-49	美国杜邦	3620	125	2.5	1.45	芳纶纤维
K-149	美国杜邦	2833	165	1.3	1.45	
Twaron HM	西德恩卡	3000	125	2.3	1.45	
CBM	苏联《化纤》	4000	130	4.0	1.43	
APMOC	苏联《化纤》	5000	145	3.5	1.43	
W芯B纤维	美国阿美科	3200~3600	400	—	2.5	
Nicalon	日本碳素	2800~3000	200	—	2.55	碳化硅纤维
Tyranno	日本友比	2800~3000	200	—	2.30~2.50	
C、SiC纤维	美国阿美科	3000~3600	420	—	3.40	
SiC晶须	日本东海	3000~14000	400~700	—	3.19	
FP	美国杜邦	1380	379	—	3.90	氧化铝纤维
住友Al ₂ O ₃	日本住友化学	1500	200	—	3.20	

厂、研究所等对复合材料的树脂基体和预浸料的质量控制就十分重视，在进行了大量性能表征研究工作后，提出了控制质量的“指纹”。80年代，美国宇航局联合波音、道格拉斯和洛克希德三大飞机公司，制订了“NASA/飞机工业碳纤维/热固型韧性树脂复合材料标准规范”，这对保证质量、降低成本起了很大的作用。

5. 材料、设计和工艺不可分割，三位一体。复合材料的两个基本特点是性能可设计性和材料与构件制造的统一性。在复合材料构件设计时可按使用条件和受力状况采用不同的增强材料、基体材料、纤维取向、铺叠程序等，以获得性能满足要求，重量最轻的构件。而且对复合材料构件来讲，不存在先制造复合材料，再加工成复合材料构件的问题，从原材料制造复合材料的过程同时也是制造复合材料构件的过程，融为一体。复合材料在军事上的应用，更必须根据武器系统的要求，把设计、材料和工艺紧密结合在一起，这三者是一个事物不可分割的三个方面。

6. 复合材料的制造工艺由手工操作, 半机械化、机械化向微机控制迈进。在60年代复合材料构件制造主要是手工操作, 70年代走向半机械化、机械化, 80年代已向微机控制迈进。特别是在军事上应用复合材料, 为了保证质量, 大量采用微机控制。美国通用动力公司, 道格拉斯公司等, 在制F-16等军用飞机复合材料构件都采用计算机自动控制铺层, 不但效率比人工铺层高五倍, 而且排除了人为因素, 确保工艺重复性, 大大提高了产品的质量, 降低了成本。近年来, 大量利用计算机辅助设计和计算机辅助制造(CAD/CAM)系统, 从预浸料存取、剪裁、铺叠、固化等直到制成产品, 全部实现微机控制, 这对保证复合材料在武器系统上应用的质量, 提高生产效率和降低成本起了重大的作用。

7. 对复合材料在军事上应用研究基础工作给予很大注意, 大力开展损伤容限、剩余强度、失效分析、缺陷与损伤的愈合及复合材料构件修复等研究工作。武器系统使用的复合材料, 在实际应用过程中不可避免地要受到撞击, 包括: 弹片、弹药、飞石、冰雹、飞鸟等, 为此大量研究围绕复合材料损伤机理、裂纹扩展、剩余强度、寿命估算、可靠性等应用基础工作。此外, 对于复合材料构件在制造、使用、作战过程中引起的缺陷与损伤的愈合与修复也高度重视, 象“复合装甲与结构现场修复”、“复合材料的构件的作战损伤修复”、“飞机热塑性构件的作战损伤修复”等都进行了专题研究, 研究成果列为“保密”范围。

8. 建立复合材料中心、复合材料研究所, 对复合材料进行系统研究, 为武器系统推广应用复合材料作出了重大贡献。象美国空军宇航复合材料研究所(Air Force Astronautics Composite Laboratory)、洛克希德公司复合材料研制中心(Composites Development Center LASC)、特拉华大学复合材料中心(Center for Composite Materials Delaware University)等。这些“中心”、“研究所”分别属于工业界、政府部门或高等院校, 得到财政和经费的支持, 从事复合材料的设计、制造、工艺、修复、表征、检测、质量控制等方面的研究, 包括专题性应用研究计划, 例如“CLAWS”计划、“REPTAS”计划等, 也包括应用基础研究计划。由于在组织机构上、人力物力、财政经费上得到了保证, 使复合材料在军事上应用取得重大进展, 不但提高了复合材料的水平, 促进了复合材料的发展, 更使复合材料在武器系统上的应用在国际上居领先地位。

四、复合材料在军事上应用研究的展望

目前复合材料在军事上应用研究可概括为“先进复合材料以树脂基复合材料为主, 特别是热固性树脂基复合材料的技术发展最成熟, 应用最广, 热塑性树脂基复合材料发展很快, 即将进入实用阶段。金属基复合材料大部分处于研究试用阶段。陶瓷基复合材料大部分处于研制试验阶段。碳/碳复合材料在军事上有很实用价值, 重获得一定推广应用。复合材料在军事上的应用, 首先是在航天与航空工业。”

展望复合材料在军事上应用前景, 可简要归纳为:

1. 复合材料在武器系统上的应用比例将不断增长, 在某些武器型号上, 将超过结构重量的百分之五、六十。

2. 复合材料的允许使用温度将进一步提高, 树脂基、金属基(包括金属间化合物基)、

金属基复合材料的进展

吴人洁

(上海交通大学 复合材料研究所)

前 言

金属材料现在仍然是各种材料中最大的品种,但是它的性能已不能满足目前对材料的高标准要求。采取复合的方法是一种有效的改进措施,因此金属基复合材料受到各先进国家的重视,而且发展迅速。美国陆军战备防御指挥部(USASDC)在一份报告中说:“当前金属基复合材料的发展大约相当于十五年前树脂基复合材料的发展速度”,表明它正处在方兴未艾、蓬勃发展的阶段。所以美国专门成立一个金属基复合材料信息分析中心(MMCIAC),普及推广金属基复合材料,特别是引导工程设计者运用这种新材料。实际上美国已在航天技术上成功地应用了金属基复合材料,并正向航天等其他工业扩展。日本在金属基复合材料方面的发展也是相当快的。根据近几年来报道其研究范围几乎包括了金属基复合材料的各个方面,而且使它在汽车工业上首先获得应用。西欧的英、法、德、意等国也投入相当的力量进行研究开发。苏联的现状不太清楚,但迹象表明他们对金属基复合材料给予很大的重视。当然,我国从70年代末期也逐步加强对这种材料研制的支持,并取得一定的成效。

金属基复合材料按其复合的形式可分为以下类型:

1. 纤维增强型。其中纤维包括连续纤维、短纤维和晶须,而基体方面也可大致分为轻金属(如铝、镁、钛)和高温金属(如镍基合金、金属间化合物),另外还有非结构用途的铜、铅、锌等。
 2. 颗粒增强剂。主要用碳化硅、氧化铝和碳化钛颗粒增强。由于颗粒的粒度较大,所以不同于金属的弥散强化。
 3. 定向凝固型。它又称原位复合材料,是以金属共晶定向生长凝固而成的。
 4. 交替叠层型,即用表面涂层的方法把两种或更多的金属薄层叠合在一起。
- 其中前两种类型是主要的。

陶瓷基、碳基复合材料可分别达到300、1000、1500和2000℃以上。

3. 高性能增强剂将取代目前宇航工业最通用的T300碳纤维,复合材料力学性能将进一步大幅度提高。

4. 复合材料将由目前单功能,逐步向双功能、三功能或更多功能方向发展。

5. 复合材料在军事上应用将由航天、航空进一步扩大到坦克、舰艇、常规武器、电子工业,并逐步在民用工业推广应用。

一、金属基复合材料的特点

金属基复合材料之所以能迅速发展起来，并在某些方面比树脂基复合材料更有竞争优势，是因为它具有以下的一些特点。

1. 高比强度、高比模量。金属基复合材料在比强度与比模量方面是可以与树脂基复合材料相媲美的，而且大大地优于一般常用的金属材料。图1示出金属基，树脂基复合材料和三种金属的比强度与比模量比较，其中一些数据是预期的指标。

2. 耐高温性好。一般树脂基复合材料只能在200℃以下使用，即使用耐高温树脂也只能提高到300℃。但金属基复合材料中，铝、镁基可使用于450℃，钛基可使用于600~700℃，如用镍基高温合金和金属间化合物作为基体则可耐1200~1500℃高温。

3. 导热导电。树脂基复合材料由于基体本身是绝热和电绝缘体，所以基本不导电且导热性也差，所以在某种场合下（如全天候飞机蒙皮），就需设法采取补救措施。但金属基体是高导电和高导热材料，所以就无需考虑其复合材料在导电导热方向存在问题。

4. 热膨胀系数小、尺寸稳定性好。金属基复合材料在热膨胀系数方面虽略优于树脂基复合材料，但尺寸稳定性明显优于后者，如果与一般金属相比则远远超过。表1列出几种金属基复合材料与Al、Ti、Be的膨胀系数和弹性模量的数值，由此即可说明其优越性。

表 1 金属基复合材料与金属的热膨胀系数

材 料	热膨胀系数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	弹性模量(GPa)
石墨纤维(P100)/Mg合金	-0.1~1.0	340
石墨纤维(P100)/Al合金	0.6	357
石墨纤维(P75)/Al合金	2.0	231
碳化硅纤维(SCS-6)/Al合金	3.3	210
碳纤维(碳芯)/Al合金	3.4	205
铍	11.5	245
钛	8.9	132
铝	23.2	73

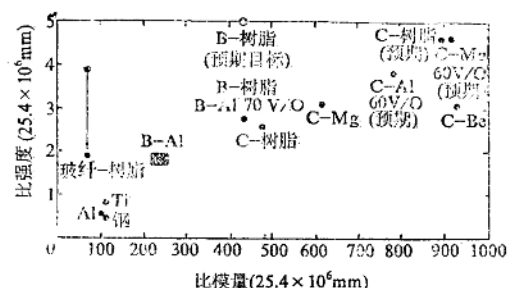


图1 金属基与树脂基复合材料和部分金属的比强

这几方面是树脂基无法与金属基复合材料相比拟的，因为树脂易吸湿，会被环境因素影响而老化，特别是在负压或真空条件下（如大气层外）会放出小分子气体而污染附近的电

5. 耐磨性与阻尼性好。金属基复合材料的阻尼性能虽然略差于树脂基复合材料但远优于一般金属，在耐磨性方面金属基复合材料也是远优于金属的，例如对比试验表明铝合金的磨损率为 $96 \times 10^{-8} \text{ mm/mm}$ ，而颗粒增强铝合金仅为 $4.5 \times 10^{-8} \text{ mm/mm}$ ，但如果用 Al_2O_3 纤维增强的铝合金则其磨损率只有 $1 \times 10^{-8} \text{ mm/mm}$ ，足以说明金属基复合材料优异的耐磨性。

6. 不吸湿、不老化、无放气污染。这

子器件。而金属基则保留了金属不吸湿、不老化、无放气污染的这些特点。

7. 可进行二次加工。短纤维、晶须和颗粒增强的金属基复合材料可以制成锭子，用常规金属二次加工的方法如模锻、挤压、轧制、旋压、拉拔等制成工件和型材。

基于以上特点，金属基复合材料能迅速地发展起来，并逐步走向工业化批量生产的阶段。

二、金属基复合材料的发展趋向

1. 关于材料的发展动态

颗粒增强Al、Mg等金属基复合材料，由于成本较低，且能用常规的金属加工方法进行二次加工成型。所以较快地在汽车及其他工业中获得应用。美国的几家大制铝公司均投入较大的资金用于扩大生产，例如Alcan公司计划扩大到万吨级规模。颗粒增强镁基复合材料近日得到较大的重视，因为用压力铸造和挤压方法制造的 SiC_p/Mg 具有良好的物理性能。例如在室温时，含量25%（体积）SiC颗粒增强的复合材料的弹性模量比未增强的合金高72%，屈服强度高47%，极限拉伸强度高23%；温度达到200℃时其性能虽有所下降但仍比室温下原合金性能好。另外随着颗粒的含量在一定范围内增加时，其弹性模量和屈服强度有所增加，但是随之而来的是断裂应度有所下降。据推测这是增强颗粒与Mg基体界面上产生脆性界面化合物层，容易在加载时产生裂纹而导致提前破坏，然而挤压成型的 SiC_p/Mg 则有较好的延性。

另外晶须和短纤维增强铝、镁等轻金属也是发展比较快的，虽然晶须价格贵，但是其增强效果比颗粒好，一般性能可比颗粒增强高出30%~50%，同时晶须的生产量如随需要量的增加而扩大，则会降低价格。值得考虑的是西欧最近拒绝生产和使用晶须，原因是它有可能诱发癌症，但晶须的生产国美国和日本尚未作出反应。短纤维增强复合材料的性能虽然不及晶须但比颗粒增强复合材料好，价格也比较便宜（如氧化铝），也是有吸引力的，特别是它们的复合材料和颗粒增强的一样都可以进行常规的二次加工，所以容易被工业界接受。

目前用颗粒、晶须和短纤维增强钛合金和金属间化合物的研究工作已经在进行，但是由于这些金属基体的熔点较高，所以不能用像Al、Mg等基体以熔体的状态与颗粒等复合而只能用粉末冶金和等离子喷涂的方法进行复合。

连续纤维增强金属基复合材料的发展相对较慢，这是因为复合工艺方面尚有不少问题有待解决。石墨纤维增强镁仍然是重点开发的对象，因为它比模量极高，特别是膨胀系数几乎为零，这些都是航天技术结构支架和卫星天线等需要的。它的复合可能仍采用复合先驱丝的方法通过真空扩散结合成型，但是具体的工艺仍是各企业保守的秘密。据称DWA复合材料专业公司获得一项此种复合材料的专利加工权，它可以直接把Mg熔体渗入纤维骨架中，已能生产出管材，薄板和厚板。

用硼纤维和碳化硅（ SiC ，CVD型如SCS-6）增强钛合金和金属间化合物的金属基复合材料是这一两年来研究的热门课题。这是因为这些复合材料的耐温性高、有优异的比强度和比模量，金属间化合物基体的复合材料还有很好的抗氧化性，这些都是航空工业中喷气发动机和宇航工业中耐热构件所需要的，金属间化合物以Ti-Al系的研究较多，一般认为以Ti₃Al最好。